

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado
**Influencia del diagrama de radiación
de la antena en la caracterización
del canal radio**

**(Influence of the antenna radiation pattern in
the radio channel characterization)**

Para acceder al Título de

**Graduado en
Ingeniería de Tecnologías de
Telecomunicación**

Autor: Stefan Andriuca

5 - Julio - 2019

Universidad de Cantabria

RESUMEN

Departamento de Ingeniería de Telecomunicaciones

Grado en Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación
Mención- Sistemas de Telecomunicación

Influencia del diagrama de radiación de la antena en la caracterización del canal radio

por Stefan ANDRIUCA

La eficiencia gracias a las exigencias de hoy en día es algo primordial a la hora de poder mantener la competitividad. Poder reducir los tiempos en realizar una tarea, sin perder calidad es algo primordial y que es de vital importancia. A lo largo de este trabajo se van a aplicar técnicas para la reducción del tiempo de simulación de antenas, para que por consiguiente se pueda mejorar la eficiencia.

Se ha usado el software de diseño y planificación de sistemas inalámbricos en recintos cerrados "CINDOOR" para realizar estudios del canal radio en diferentes entornos utilizando antenas isotrópicas.

En este tipo de herramientas el tiempo empleado en las simulaciones depende fuertemente del grado de complejidad del modelo geométrico, de forma que utilizar diferentes antenas diferentes a las isotrópicas implica realizar nuevas simulaciones de gran coste computacional. El objetivo de este trabajo es poder seleccionar diferentes antenas realizando una sola simulación en CINDOOR. De esta forma quedaría caracterizado el canal con independencia de las antenas utilizadas.

University of Cantabria

ABSTRACT

Department of Telecommunications Engineering

Bachelor in Telecommunications Technology Engineering
Major - Telecommunication Systems

Influence of the antenna radiation pattern in the radio channel characterization

by Stefan ANDRIUCA

Efficiency thanks to the demands of today is paramount when it comes to maintaining competitiveness. Being able to reduce the time to perform a task without losing quality is paramount and is of vital importance. Throughout this work, techniques to reduce antenna simulation time will be applied, so that efficiency can be improved.

The "CINDOOR" wireless systems design and planning software has been used to conduct studies of the radio channel in different environments using isotropic antennas.

In this type of tools, the time used in the simulations depends strongly on the degree of complexity of the geometric model, so that using different antennas different from the isotropic ones implies carrying out new simulations of great computational cost. The objective of this work is to be able to select different antennas performing a single simulation in CINDOOR. In this way the channel would be characterized independently of the antennas used.

AGRADECIMIENTOS

A lo largo de estos años en la Universidad, he tenido experiencias, hazañas, momentos que han definido multitud de facetas de mi persona y esos momentos que no van a ser olvidados, siempre quedarán zanjados por el hecho de haber podido finalizar esta etapa de mi vida.

El hecho de poder escribir estas palabras no habría sido posible sin la ayuda en primer lugar de mis padres, que siempre han estado allí en los momentos buenos y en los malos.

En segundo lugar me gustaría agradecerle al director del proyecto "Luis Valle López" por haber sido de gran apoyo y haber puesto tanta dedicación en asesorarme.

En un final no puedo olvidarme de las personas que han compartido conmigo esta etapa y que sé que compartiremos muchas más.

¡Muchas Gracias!

ÍNDICE

1. Introducción.....	2—1
1.1 Contextualización.....	2—1
1.2 Objetivos.....	2—2
1.3 Estructura.....	2—3
2 Bases Teóricas.....	2—4
2.1 Radiocomunicación.....	2—4
2.2 Antena.....	2—5
2.3 Antena Isotrópica.....	2—6
2.4 Reciprocidad de antenas.....	2—7
2.5 Sistemas de coordenadas de la antena.....	2—7
2.6 Parámetros característicos de una antena.....	2—8
2.6.1 Densidad de flujo de potencia.....	2—8
2.6.2 Directividad.....	2—8
2.6.3 Ganancia.....	2—10
2.6.4 Diagrama de radiación.....	2—10
2.6.5 Polarización de la antena.....	2—13
2.7 Dipolo de Hertz.....	2—14
2.7.1 Ganancia.....	2—14
2.7.2 Alturas Efectivas.....	2—14
2.8 Dipolo de media longitud de onda.....	2—14
2.8.1 Ganancia.....	2—14
2.8.2 Altura Efectiva.....	2—14
3 Software , Bases teóricas de simulación, Entorno.....	3—15
3.1 CINDOOR.....	3—15
3.1.1 Introducción Software.....	3—15
3.1.2 Base Teórica Software.....	3—16
3.1.3 Estructura de los archivos generados por CINDOOR.....	3—25
3.2 Matlab.....	3—29
3.2.1 Obtención, procesamiento y utilización de los datos necesarios.....	3—29
3.2.2 Desarrollo de una aplicación mediante App Designer.....	3—30
3.3 Entorno de Simulación.....	3—32
4 Realización e Interpretación de las Simulaciones.....	4—35
4.1 Métodos y cálculos llevados a cabo.....	4—35

4.1.1	Carga de los datos e asignación de variables	4—35
4.1.2	Cambio de las direcciones y campos en el sistema de ejes de la antena receptora.....	4—35
4.1.3	Caracterización de las antenas.....	4—37
4.1.4	Cálculo del voltaje de cada dirección de llegada (de cada rayo)	4—37
4.2	COMPROBACIÓN DE RESULTADOS.....	4—37
4.3	Realización e interpretación de las simulaciones	4—38
4.3.1	Parámetros Generales de Simulación	4—39
4.3.2	Comparación tiempos empleados en simulación	4—54
4.3.3	Dificultades encontradas y soluciones aplicadas.....	4—58
4.4	Conclusiones Generales y Líneas Futuras.....	4—60
4.4.1	Conclusiones Generales	4—60
4.4.2	Líneas Futuras.....	4—61
5	Bibliografía.....	5—64

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Bandas de frecuencias.....	2—4
Tabla 2 Características y valores Caso 1.	4—39
Tabla 3 Valores Posicionamiento 1.	4—39
Tabla 4 Valores Posicionamiento 2	4—47
Tabla 5 Datos Generales Simulación Salón de actos.....	4—55
Tabla 6 Tiempo de simulación de las antenas	4—56
Tabla 7 Análisis detallado simulación Tx: Dipolo Elemental; Rx: Dipolo $\lambda/2$	4—56

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Antena.....	2—5
Figura 2.2. Circuito de acoplamiento con antena.	2—6
Figura 2.3. Circuito antena transmisora y antena receptora.	2—6
Figura 2.4. Coordenadas Esféricas	2—7
Figura 2.5. Radiador isotrópico.	2—8
Figura 2.6. Volumen de radiación antena hasta el punto P.....	2—8
Figura 2.7. Gráfica de Radiación Relativa, potencia variable y distancia fija.....	2—11
Figura 2.8. Gráfica de Potencia Absoluta, potencia fija y distancia variable.	2—11
Figura 2.9. Representación Diagrama de Radiación en cartesianas.....	2—12
Figura 2.10. Lóbulos principales del Diagrama de Radiación.....	2—12
Figura 2.11. Tipos de polarizaciones en antenas.....	2—13
Figura 3.1. Cambios de direccionamiento de los rayos de un medio a otro.	3—18
Figura 3.2. (a) El cono de los rayos difractados producido por un rayo incidente que golpea oblicuamente el borde de una pantalla delgada. (b) El plano de rayos difractados producido por un rayo que incide normalmente en el borde de una pantalla delgada.	3—20
Figura 3.3. La proyección de rayos incidentes y difractados en un plano normal al borde de una pantalla. Los ángulos α y θ son aquellos entre las proyecciones y la normal a la pantalla, medidos como se muestra en la figura. El borde es normal al plano de la figura.	3—21

Figura 3.4. Estos son los rayos difractados producidos por una onda plana de incidencia normal, en una rendija en una pantalla delgada. Se muestran los dos rayos incidentes que golpean los bordes de la rendija, con algunos de los rayos difractados levemente que generan. Un rayo difractado de cada borde se muestra cruzando la rendija y golpeando el borde opuesto, produciendo rayos doblemente difractados.....	3—21
Figura 3.5. Plano laboratorio con objetos	3—32
Figura 3.6. Dimensiones paredes y objetos.	3—33
Figura 3.7. Visualización tridimensional laboratorio.....	3—34
Figura 4.1. Posicionamiento antenas 1.....	4—40
Figura 4.2. <i>Respuesta Impulsiva Dipolo de Hertz ángulos Rx: $\theta=35^\circ$; $\phi=45^\circ$</i>	4—41
Figura 4.3. Relación Voltajes caso: <i>Dipolo de Hertz ángulos Rx: $\theta=35^\circ$; $\phi=45^\circ$</i> ..	4—41
Figura 4.4. <i>Respuesta Impulsiva Dipolo $\lambda/2$ ángulos Rx: $\theta=35^\circ$; $\phi=45^\circ$</i>	4—42
Figura 4.5. Relación Voltajes caso: <i>Dipolo $\lambda/2$ ángulos Rx: $\theta=35^\circ$; $\phi=45^\circ$</i>	4—42
Figura 4.6. <i>Respuesta Impulsiva Dipolo de Hertz ángulos Rx: $\theta=47^\circ$; $\phi=97^\circ$</i>	4—43
Figura 4.7. Relación Voltajes caso: <i>Dipolo de Hertz ángulos Rx: $\theta=47^\circ$; $\phi=97^\circ$</i> ...	4—43
Figura 4.8. <i>Respuesta Impulsiva Dipolo $\lambda/2$ ángulos Rx: $\theta=47^\circ$; $\phi=97^\circ$</i>	4—44
Figura 4.9. Relación Voltajes caso: <i>Dipolo $\lambda/2$ ángulos Rx: $\theta=47^\circ$; $\phi=97^\circ$</i>	4—44
Figura 4.10. <i>Respuesta Impulsiva Dipolo de Hertz ángulos Rx: $\theta=180^\circ$; $\phi=90^\circ$</i> ...	4—45
Figura 4.11. Relación Voltajes caso: <i>Dipolo de Hertz ángulos Rx: $\theta=180^\circ$; $\phi=90^\circ$</i> .	4—45
Figura 4.12. <i>Respuesta Impulsiva Dipolo $\lambda/2$ ángulos Rx: $\theta=189^\circ$; $\phi=90^\circ$</i>	4—46
Figura 4.13. Relación Voltajes caso: <i>Dipolo $\lambda/2$ ángulos Rx: $\theta=189^\circ$; $\phi=90^\circ$</i>	4—46
Figura 4.14. Posicionamiento 2.....	4—47
Figura 4.15. <i>Respuesta Impulsiva Dipolo de Hertz ángulos Rx: $\theta=23^\circ$; $\phi=45^\circ$</i>	4—48
Figura 4.16. Relación Voltajes caso: <i>Dipolo de Hertz ángulos Rx: $\theta=23^\circ$; $\phi=45^\circ$</i> .	4—48
Figura 4.17 <i>Respuesta Impulsiva Dipolo $\lambda/2$ ángulos Rx: $\theta=23^\circ$; $\phi=45^\circ$</i>	4—49
Figura 4.18. Relación Voltajes caso: <i>Dipolo $\lambda/2$ ángulos Rx: $\theta=23^\circ$; $\phi=45^\circ$</i>	4—49
Figura 4.19. <i>Respuesta Impulsiva Dipolo de Hertz ángulos Rx: $\theta=78^\circ$; $\phi=56^\circ$</i>	4—50
Figura 4.20. Relación Voltajes caso: <i>Dipolo de Hertz ángulos Rx: $\theta=78^\circ$; $\phi=56^\circ$</i> .	4—50
Figura 4.21. <i>Respuesta Impulsiva Dipolo $\lambda/2$ ángulos Rx: $\theta=78^\circ$; $\phi=56^\circ$</i>	4—51

Figura 4.22. Relación Voltajes caso: <i>Dipolo $\lambda/2$ ángulos Rx: $\theta=78^\circ$; $\phi=56^\circ$</i>	4—51
Figura 4.23. <i>Respuesta Impulsiva Dipolo de Hertz ángulos Rx: $\theta=188^\circ$; $\phi=235^\circ$</i> ...	4—52
Figura 4.24. Relación Voltajes: <i>Dipolo de Hertz ángulos Rx: $\theta=188^\circ$; $\phi=235^\circ$</i>	4—52
Figura 4.25. Salón de Actos 2D.....	4—54
Figura 4.26. Salón de Actos en 3D	4—55
Figura 4.27. Diagrama de Radiación Antena Hyperlink HG2458-08LP	4—62
Figura 4.28. Aplicación desarrollada con Visual Basic	4—62

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Contextualización

A lo largo de los últimos años se han experimentado grandes cambios en el mundo de las telecomunicaciones, primeramente debido a los avances tecnológicos que han habido, como la implementación de tecnologías *BIG DATA* que mueven cantidades enormes de información, tecnologías cloud que han cambiado totalmente los negocios, además los usuarios han cambiado sus patrones de comportamiento, demandando cada vez más servicios en movilidad, inmediatez e interacción. Estos son algunos de los factores que han hecho que una industria que ya estaba saturada tenga que lidiar con una complejidad adicional. En las ciudades hay una congestión de señales importante y es de vital importancia poder controlar el espectro en micro y pico células urbanas para poder proporcionar transmisiones de calidad.

Los operadores tradicionales se enfrentan a un nuevo ciclo de inversor de despliegue de redes de nueva generación, para lograr atender el crecimiento geométrico de las distintas demandas. A lo largo de este trabajo se va a llevar a cabo un análisis de un entorno real, con el objetivo de hacer más eficiente la transmisión y recepción entre antenas, utilizando simulaciones computacionales de las antenas.

Una antena es un dispositivo que se encarga de transmitir y/o recibir señales electromagnéticas con frecuencias FM o AM, al espacio libre. Una antena transmisora se encarga de transformar las señales eléctricas en señales electromagnéticas y las antenas receptoras realizan el proceso contrario.

Hoy en día hay multitud de tipos de antenas, que han sido diseñadas para cumplir las necesidades de cada caso en particular. Si por ejemplo solamente se quiere transmitir una señal a otra antena, se usarían antenas directivas, pero si se quiere transmitir la señal a antenas receptoras que están situadas en diferentes localizaciones dentro del rango de la antena, se usaría una antena omnidireccional. La elección o diseño de las mismas depende de la función que se quiere desempeñar, de la localización, de los factores ambientales, factores meteorológicos, etc.

Una antena tiene una relación directa entre las dimensiones de la misma y la longitud de onda de la señal de radiofrecuencia de la señal transmitida o recibida. Las antenas elementales son las que tienen un tamaño mucho más pequeño que la longitud de onda de la señal, las antenas resonantes son las que tienen dimensiones en torno a la mitad de la longitud de onda y las antenas directivas son las antenas que tienen dimensiones mucho mayores a la longitud de onda.

Entre la gran variedad de funciones que pueden desempeñar las antenas algunas de ellas son: comunicaciones satelitales (televisión, internet, geolocalización), radares, comunicaciones móviles, etc.

1.2 Objetivos

El objetivo de este proyecto es poder obtener el diagrama de radiación de todo tipo de antenas, realizando solamente una simulación del sistema de telecomunicación entre la antena transmisora y la antena de receptora. Este aspecto se puede llevar a cabo si la antena que se simula en recepción, es una antena isotrópica. Este tipo de antena se caracteriza por tener un diagrama de radiación omnidireccional, por tanto, que irradia los 360 grados. Lo que relaciona a la antena isotrópica con las otras antenas es la ganancia, por consiguiente, si se multiplican los resultados de la antena isotrópica por la ganancia de la antena que se desee caracterizar, se obtendrá el comportamiento de esta antena.

Una vez colocados el transmisor y el receptor, el programa CINDOOR esta programado para encontrar los diferentes mecanismos de acoplo que conectan las dos antenas: rayo directo, rayos reflejados y múltiplemente reflejados, difractados y múltiplemente difractados, y combinaciones de todos ellos. Cuando el rayo sale de la antena Tx, se multiplica el campo electromagnético por la ganancia en transmisión G_{Tx} , en la dirección de transmisión de la antena, teniendo en cuenta los ángulos θ y Φ de salida de la antena Tx. Cuando los rayos llegan a la antena receptora, se multiplica el Campo Magnético por la ganancia en recepción G_{Rx} en la dirección de llegada, teniendo en cuenta los ángulos θ y Φ de entrada, en la antena Rx.

Este es el proceso que sigue CINDOOR en transmisión y en recepción. En este proyecto se pone en tela de juicio la necesidad de simular el sistema cada vez que se cambien las antenas y se propone utilizar antenas isotrópicas para la simulación. Este tipo de antenas describen un diagrama de radiación, de la forma de una esfera. Son antenas teóricas que se utilizan para la implementación de antenas reales, y se caracterizan por no depender de la ganancia. Este hecho permite que no sea necesario conocer el comportamiento de los rayos de llegada a la antena isotrópica, ya que irradia los 360°.

Por tanto, si se dispone del Campo Isotrópico, aplicando las correcciones pertinentes, se pueden caracterizar las antenas que el desarrollador necesite, sin tener la necesidad de volver a simular.

1.3 Estructura

La estructura del proyecto se caracteriza por estar compuesta de 4 capítulos:

- El primer capítulo lo constituye la Introducción, se compone por el tema a tratar, los objetivos y la estructura del proyecto.
- En el segundo capítulo, se refleja la información teórica en la que se basa el proyecto.
- En el tercero, se describen las principales funcionalidades, teorías y estructura de los archivos, en las que se basa el software de simulación utilizado. Este es el programa desarrollado en el departamento DICOM de la Universidad de Cantabria llamado “CINDOOR”. También se hace referencia del entorno de simulación elegido, describiéndolo mediante planos. MatLab es de vital importancia en este proyecto y por consiguiente es conveniente que se describan las funcionalidades y opciones utilizadas. Para reducir la complejidad y aumentar la eficiencia, se ha desarrollado la aplicación “APP Designer” perteneciente a MatLab. Se han realizado descripciones de la utilidad de la misma, las diferentes opciones disponibles y resultados obtenidos al utilizarla.
- En el capítulo 4 se reflejan los resultados obtenidos en las simulaciones. Se ponen en tela de juicio, se examinan y se refleja la veracidad de los mismos. Se describen las diferentes experiencias llevadas a cabo a la hora de realizar el proyecto, como las veces que se ha conseguido lo buscado, o las veces que se han tenido que buscar soluciones u otras vías de trabajo. También se reflejará un análisis temporal que determinará la eficiencia de esta tecnología. El documento se finalizará con las conclusiones finales de los resultados obtenidos y con las líneas futuras del mismo.
- En la última parte del documento se describe la bibliografía utilizada como apoyo al proyecto llevado a cabo.

2 BASES TEÓRICAS

A lo largo de este capítulo se van a describir las teorías, características y modelos que tienen importancia en el desarrollo de este proyecto. Se realizará una breve descripción de las cuestiones que se consideren pertinentes, con el objetivo de facilitar la comprensión de los conceptos utilizados en el proyecto y de las conclusiones obtenidas.

2.1 Radiocomunicación

La radiocomunicación es una forma de comunicación a distancia, que utiliza las ondas de radio u ondas hertzianas para transmitir la información de un punto a otro. Las ondas se transmiten por el canal radio con la ayuda de antenas, que normalmente suelen ser lineales (la señal recibida es una suma de versiones retrasadas y atenuadas (o amplificadas) de la señal transmitida) y recíprocas (las propiedades del canal al transmitir del punto inicial al final son las mismas que transmitiendo del punto final al inicial). En el canal radio se tiene la propiedad de in-varianza en el tiempo, haciendo que este sea lineal, recíproco y variante en el tiempo. A continuación se ven reflejadas las diferentes bandas de frecuencias existentes (Fuentes 2012):

Tabla 1 Bandas de frecuencias.

Banda	Denominación	Frec. Min	Frec. Max	L Max	L Min
ELF	Extremely Low	-	3kHz	-	100 km
VLF	Very Low	3Hz	30 Hz	100 km	10 km
LF	Low	30 Hz	300 kHz	10 km	1 km
MF	Medium	300 kHz	3 MHz	1 km	100 m
HF	High	3 MHz	30 MGz	100 m	10 m
VHF	Very High	30 MHz	300MHz	10 m	1 m
UHF	Ultra High	300 MHz	3 GHz	1 m	10 cm

SHF	Super High	3 GHz	30 GHz	10 cm	1 cm
EHF	Extremely High	30 GHz	300 GHz	1 cm	1 mm

2.2 Antena

La antena es un aparato de construcción metálica que transmite información al espacio, mediante la utilización de ondas electromagnéticas. La antena transmisora transforma la energía eléctrica en ondas electromagnéticas y la transmite mediante el canal de propagación hacia la antena receptora que al recibir las ondas las transforma en señal eléctrica. Las antenas se utilizan para conectar las líneas de transmisión al espacio libre, el espacio libre a las líneas de transmisión o ambas cosas (Colaboradores Wikipedia 2017).



Figura 2.1. Antena.

Las antenas se pueden diseñar, para que irradien la potencia según se desee, por ejemplo si se quiere utilizar una antena en una estación de radiodifusión, haría falta una antena omnidireccional (irradia en todas las direcciones) o sino por ejemplo si solamente se quieren comunicar dos puntos, se necesitarían antenas directiva que irradien la potencia entre ella.

Las conexiones entre el transmisor y el receptor se pueden realizar mediante la utilización del espacio libre, antenas, y líneas de transmisión. Para representar un circuito de acoplamiento con antena se utiliza una red de cuatro terminales como el de la fig. 2.2. El circuito básico de una antena transmisora está compuesto por el generador de señal V_S , la impedancia del generador de señal Z_S , y la impedancia de la antena transmisora Z_A , como se puede ver en la fig. 2.3. Por el otro lado el circuito de la antena receptora se representa mediante la impedancia de recepción Z_R , la impedancia de la antena de recepción Z_A , y el voltaje de llegada V_A (Tomasi n.d.).

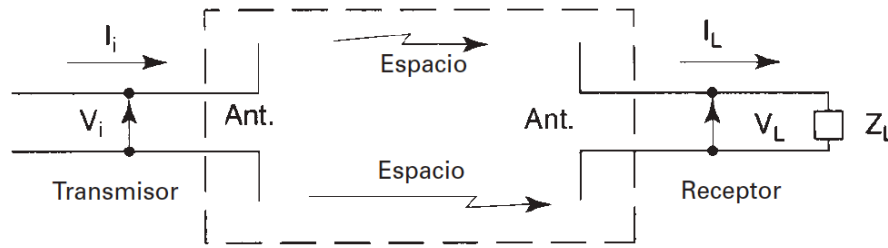


Figura 2.2. Circuito de acoplamiento con antena.

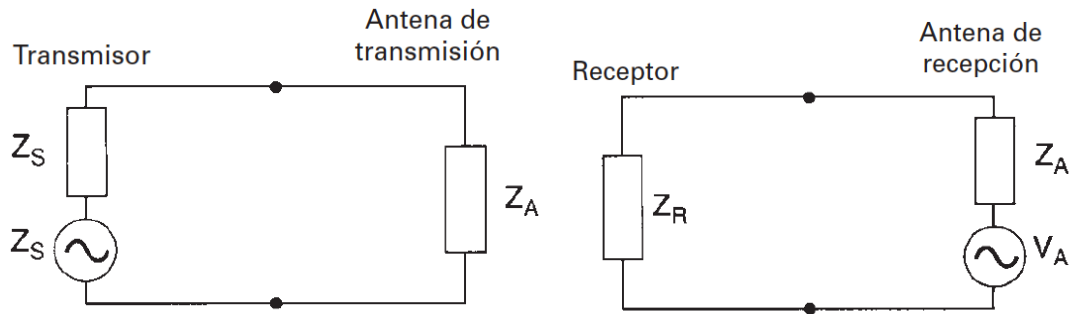


Figura 2.3. Circuito antena transmisora y antena receptora.

2.3 Antena Isotrópica

Se define como antena isotrópica a un punto emisor de ondas electromagnéticas que radia uniformemente en todas direcciones, de manera que la energía se distribuye uniformemente en forma esférica en el espacio. La antena isotrópica es un radiador ideal que no existe en la práctica, pero cuyo concepto es de gran utilidad para analizar el comportamiento de antenas reales, cuyas características suelen expresarse en relación a la antena isotrópica como antena patrón. En este trabajo se utilizará como antena de referencia o patrón a la antena isotrópica. No hay que olvidar que la antena isotrópica es en realidad un concepto y no una antena real, en tanto que un dipolo es una antena real, muy fácil de construir y la más utilizada sobre todo para mediciones. Al consultar las especificaciones de antenas reales, es indispensable saber en referencia a qué antena están dadas, si a un dipolo de $\lambda/2$ o una antena isotrópica. En realidad, la utilización de uno u otro patrón es sólo cuestión de gusto o de hábito y, según se mencionó antes, aquí usaremos la antena isotrópica como referencia (Vega 2007).

2.4 Reciprocidad de antenas

Una antena se caracteriza por ser un sistema recíproco pasivo, recíproco porque se comporta de igual manera en transmisión como en recepción, teniendo en consideración por ejemplo la ganancia, la directividad, la frecuencia de operación, el ancho del haz, la resistencia de radiación, la eficiencia, etc., y pasivo debido a que como tal, no puede amplificar la señal, aunque en algunos casos sí que podría tener ganancia.

En relación a la recepción de potencia electromagnética, se aprecia que la antena recibe la potencia de la misma forma que la que transmite, teniendo por consiguiente el mismo patrón de radiación en transmisión que en recepción. Esto es consecuencia inmediata del principio de reciprocidad, propiedad relevante del canal radio, el que incluye las antenas más la propagación. Por esta propiedad, dadas dos antenas, incluso distintas, la potencia recibida por una cuando se entrega una potencia determinada a la otra es la misma que la recibida cuando se entrega la misma potencia a la otra.

Esta característica de las antenas tiene una gran importancia en la práctica, ya que las estaciones de radiolocalización por impulsos, generalmente tienen una antena común para la transmisión y para la recepción (Fuentes 2012).

2.5 Sistemas de coordenadas de la antena

Las ondas electromagnéticas transmitidas o recibidas por una antena, se representan usualmente mediante coordenadas esféricas, por consiguiente si el lector se coloca en el centro, la distancia a cualquier punto en la superficie de la esfera se puede considerar utilizando el radio de esfera r y el ángulo polar θ y el azimut Φ . El plano cero es el XY y se llama el plano ecuatorial, y los planos que estén a 90° de este se llaman plano meridianos (Tomasi n.d.).

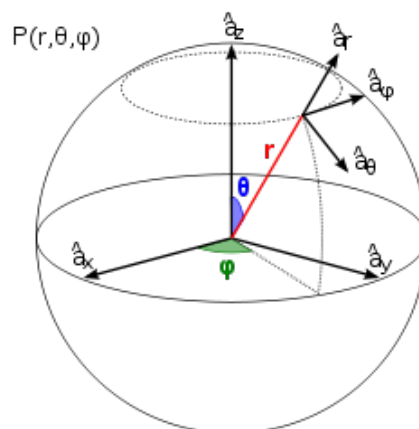


Figura 2.4. Coordenadas Esféricas

2.6 Parámetros característicos de una antena

2.6.1 Densidad de flujo de potencia

Se va a suponer que en el centro de la fig. 2.5, se coloca una antena isotrópica, que por su definición, irradia ondas electromagnéticas con la misma potencia los 360° (omnidireccionalmente), por tanto la totalidad de esa potencia W_0 se podría decir que esta contenida en una esfera con radio r_0 , posibilitando hablar de la densidad de flujo de potencia, como la potencia que atraviesa una unidad de área de esa esfera ficticia. Por tanto, a una distancia r_0 se podría definir la densidad de flujo de potencia como:

$$S_0 = \frac{W_0}{4\pi r_0^2} \quad \text{watt/m}^2 \quad (2.1)$$

Siendo S_0 , la densidad de flujo de potencia, valor del vector de Poynting en el punto P. W_0 es la potencia radiada por la antena isotrópica y r_0 , la distancia de ésta al punto P (Vega 2007).

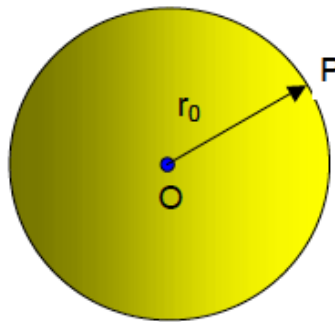


Figura 2.5. Radiador isotrópico.

2.6.2 Directividad

En el apartado anterior se ha hablado de distribuir la potencia radiada omnidireccionalmente, pero se puede dar el caso de que se necesite concentrar esa potencia en un ángulo sólido omega, de igual manera a la que se aprecia en la fig.2.6 :

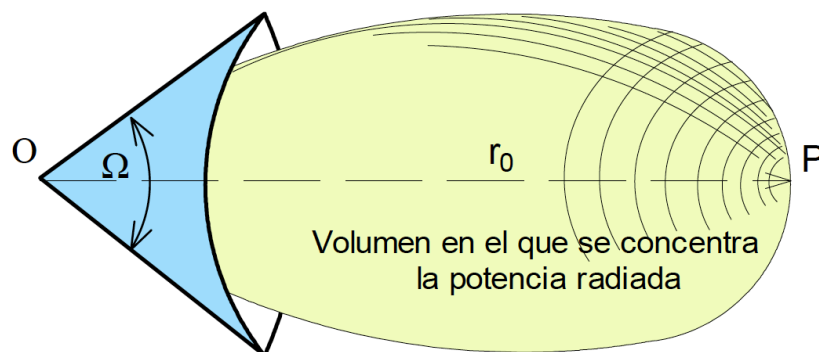


Figura 2.6. Volumen de radiación antena hasta el punto P.

El punto O, la potencia contenida en el volumen y el punto P son los mismos, lo que cambia es el tipo de antena. Teniendo estas condiciones, se puede apreciar claramente que la densidad de flujo de potencia en P, será mayor que en el caso anterior, al estar la potencia concentrada. Si se designa a la nueva DFP como S_1 , ahora teniendo una antena isotrópica ideal con una potencia W_1 (potencia irradiada de la antena no isotrópica, la potencia de alimentación sigue siendo la de la isotrópica es decir W_0), se obtiene que:

$$S_1 = \frac{W_1}{4\pi r_0^2} \text{ watt/m}^2 \quad (2.2)$$

W_1 se designa como la potencia radiada equivalente o efectiva y se relaciona con W_0 mediante la expresión:

$$W_1 = DW_0 \quad (2.3)$$

Siendo D la directividad (constante adimensional que describe la capacidad de concentración de la energía electromagnética en una región del espacio), S_0 la potencia irradia por la antena isotrópica.

La DFP en las antenas no isotrópicas varían según la dirección respecto a la antena, por tanto la directividad en coordenadas polares, teniendo en cuenta la posición sería:

$$D(\theta, \phi) = \frac{S(\theta, \phi)}{S_0} \quad (2.4)$$

La máxima directividad sería:

$$D_{max} = \frac{S_{max}}{S_0} \quad (2.5)$$

La DFP en función de la intensidad del campo eléctrico o magnético sería:

$$S(\theta, \phi) = \frac{|E(\theta, \phi)|^2}{2Z_0} \quad (2.6)$$

Donde $|E(\theta, \phi)|$ es el valor pico de la intensidad de campo eléctrico a una distancia r , en la dirección (θ, ϕ) y Z_0 es la impedancia de onda o impedancia característica del medio en que se propaga la onda que está dada por :

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (2.7)$$

Para el espacio libre $Z_0 = 120\pi = 377 \text{ Ohm}$.

Directividad en función del campo eléctrico, W_0 , Z_0 :

$$D(\theta, \phi) = c \frac{|E(\theta, \phi)|^2 r^2}{60W_0} \quad (2.8)$$

Y para el espacio libre:

$$D_{max} = \frac{E^2_{max} r^2}{60 W_0} \quad (2.9)$$

(Vega 2007)

2.6.3 Ganancia

La Directividad supone a la antena como sin pérdidas, pero esto no es verdad ya que parte de la potencia suministrada se pierde, los materiales no son conductores perfectos, hay pérdidas por los dieléctricos, calor etc, por causas como estas la eficiencia de la antena no es del 100% y al tener en consideración estos aspectos, se define entonces la ganancia directiva como:

$$G(\theta, \phi) = \eta D(\theta, \phi) \quad (2.10)$$

Donde η es el factor de eficiencia de la antena (entre 0 y 1).

La ganancia en la dirección de máxima radiación es:

$$G_{max} = \eta D_{max} \quad (2.11)$$

$$G = \frac{\text{Potencia efectiva radiada por la antena en dirección } (\theta, \phi)}{\text{Potencia suministrada en los terminales de la antena}} \quad (2.12)$$

La directividad expuesta anteriormente no tenía en consideración las pérdidas, pero la ecuación de la ganancia expuesta, sí que tiene en cuenta la totalidad de las pérdidas causadas por las imperfecciones. Gracias a la forma de como se ha descrito la ganancia, se puede comprender de manera fácil el comportamiento de una antena como emisor, pero cuando la antena actúa como receptor aunque el concepto de ganancia sigue siendo el mismo, el comportamiento físico se explica de mejor manera relacionando los conceptos de área o abertura efectiva (Vega 2007).

2.6.4 Diagrama de radiación

El diagrama, o patrón de radiación es la expresión, bien sea analítica o gráfica, de la variación de la potencia, la intensidad del campo eléctrico o la ganancia, respecto a la posición de la antena.

El diagrama de radiación de una antena suele representarse mediante cortes extraídos del diagrama tridimensional para una ϕ constante y/o una θ constante (planos principales). Estos cortes se pueden representar en coordenadas polares o cartesianas. (Vega 2007)

La función $G(\theta, \phi)$ es la ecuación analítica del diagrama de radiación y en su forma normalizada se expresa de esta manera:

$$F(\theta, \phi) = \frac{G(\theta, \phi)}{G_{max}} \quad (2.13)$$

Donde G_{max} es la ganancia en la dirección de máxima radiación, $F(\theta, \phi)$ y $G(\theta, \phi)$ son funciones tridimensionales en coordenadas esféricas, calculadas a una distancia fija respecto a la antena.

Mediante gráficas polares, se representan las intensidades del campo eléctrico o las densidades de potencia, tomando como referencia las diferentes posiciones angulares en relación a una antena. (Vega 2007)

El diagrama de radiación se puede representar teniendo en cuenta los términos de intensidad de campo eléctrico o de densidad de potencia en función a un punto en concreto, llamándose en este caso, gráfica de radiación relativa, en donde la potencia es variable y la distancia es fija, como se aprecia en la figura. 2.7, o también se traza tomando en cuenta los términos de intensidad de campo eléctrico o de densidad de potencia, llamándose en este caso, gráfica de radiación absoluta en la que la potencia es fija y la distancia es variable como en la figura 2.8 (Tomasi n.d.).

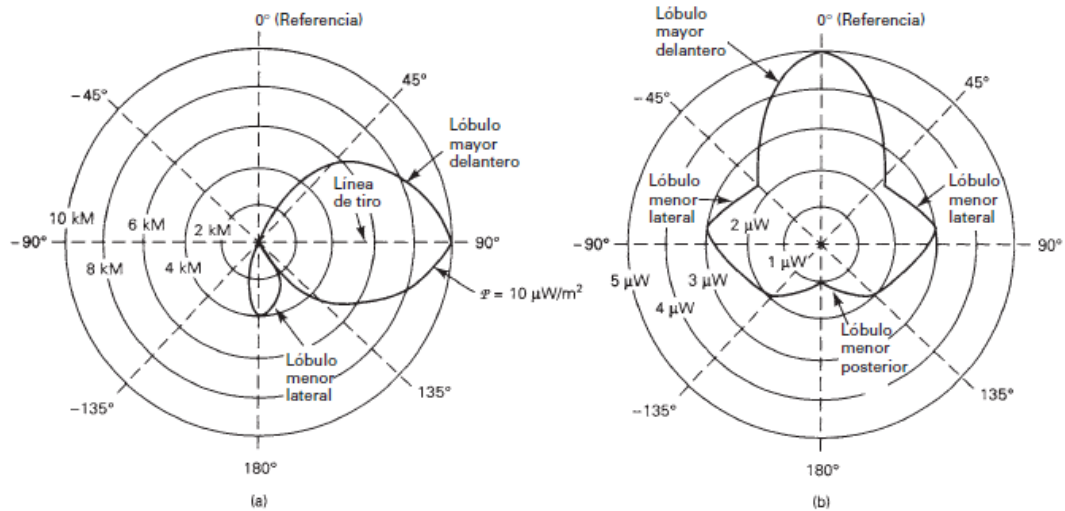


Figura 2.7. Gráfica de Radiación Relativa, potencia variable y distancia fija.

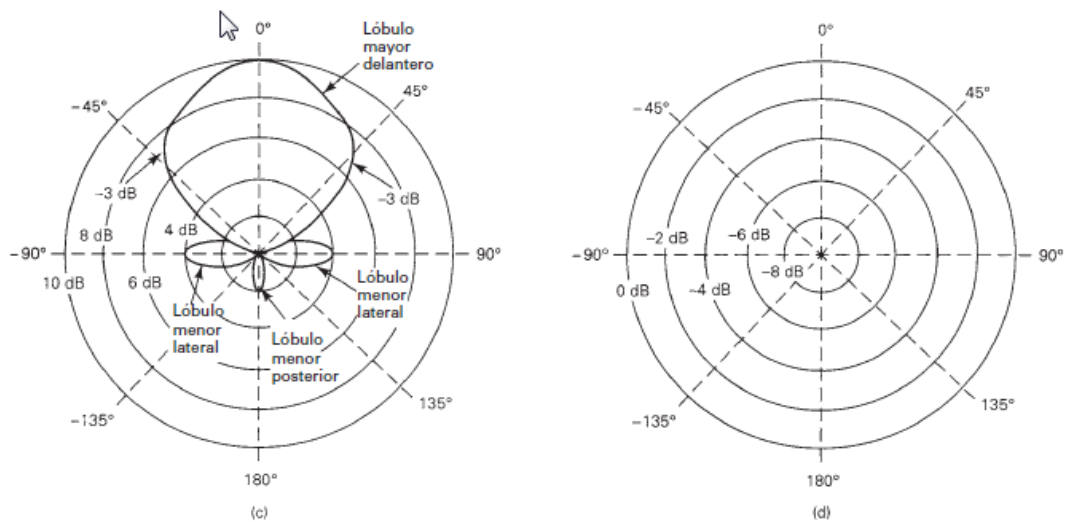


Figura 2.8. Gráfica de Potencia Absoluta, potencia fija y distancia variable.

Un ejemplo del diagrama de radiación representado en coordenadas cartesianas se puede ver en la fig. 2.9.

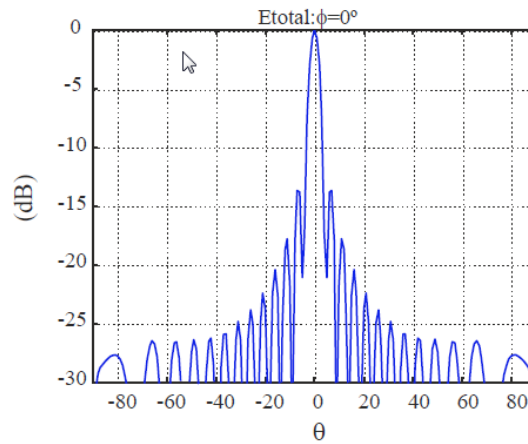


Figura 2.9. Representación Diagrama de Radiación en cartesianas.

En la figura 2.9. se aprecia otra forma bastante habitual utilizada en la representación del diagrama de radiación, estando en este caso en escala logarítmica. Un diagrama relativo logarítmico tiene el máximo en 0 dB y el resto de direcciones del espacio con dB negativos. Cuando la escala es logarítmica, los diagramas de campo y de potencia son idénticos.

Parámetros principales de un diagrama de radiación:

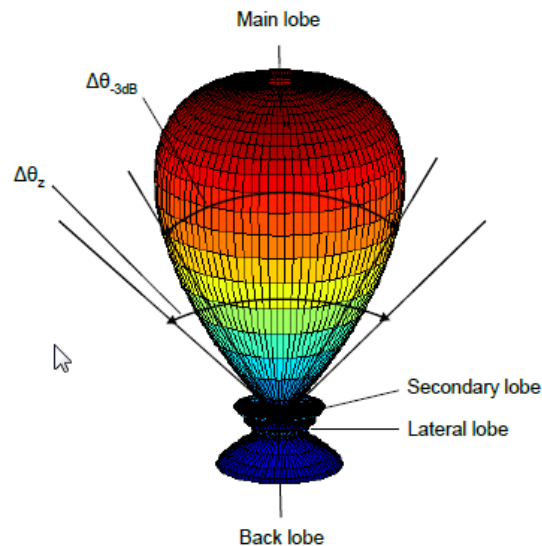


Figura 2.10. Lóbulos principales del Diagrama de Radiación.

Estos son los principales parámetros de un diagrama de radiación:

- Lóbulo principal: zona en la que la radiación es máxima.
- Lóbulos laterales: zona que rodea los máximos de menor amplitud.
- Lóbulo secundario: lóbulo lateral de mayor amplitud
- Lóbulo posterior: zona diametralmente opuesta al lóbulo principal.

- Ancho de haz a mitad de potencia ($\Delta\theta_{-3dB}$): separación angular de las direcciones en las que el diagrama de radiación de potencia toma el valor mitad del máximo. En campo eléctrico en 0'707 del máximo.
- Ancho de haz entre ceros ($\Delta\theta_z$): separación angular en las direcciones del espacio en las cuales el lóbulo principal toma un valor nulo.
- Relación delante-detrás (D/D): cociente entre el lóbulo principal y el lóbulo posterior [dB].
- Relación lóbulo principal a secundario (NLPS): cociente entre el lóbulo principal y el lóbulo secundario, que suele ser adyacente al lóbulo principal [dB].

Generalmente se encuentra el acrónimo NLPS como SLL del inglés Side Lobe Level.

Los rayos procedentes de las diferentes partes de una antena, llegan al campo lejano con diferente magnitud y fase a causa de las variaciones de corriente sobre la estructura del elemento radiante. La interferencia de estos rayos en las diferentes direcciones del espacio puede ser constructiva o destructiva, de aquí que aparezcan zonas donde la radiación es mayor y otros donde es menor (lóbulos) (Tomasi n.d.).

2.6.5 Polarización de la antena

Este concepto se refiere a la orientación que tiene el campo eléctrico al irradiarse de una antena, pudiendo ser realizado de manera lineal (en el plano horizontal o vertical), elípticamente o circularmente. Se dice que las antenas están polarizadas verticalmente, horizontalmente si irradian las ondas electromagnéticas con polarización vertical u horizontal, si el campo eléctrico gira describiendo una elipse, está elípticamente polarizada y si gira circularmente esta circularmente polarizada, en la fig. 2.11 se pueden apreciar las diferentes polarizaciones expuestas. (Vega 2007)

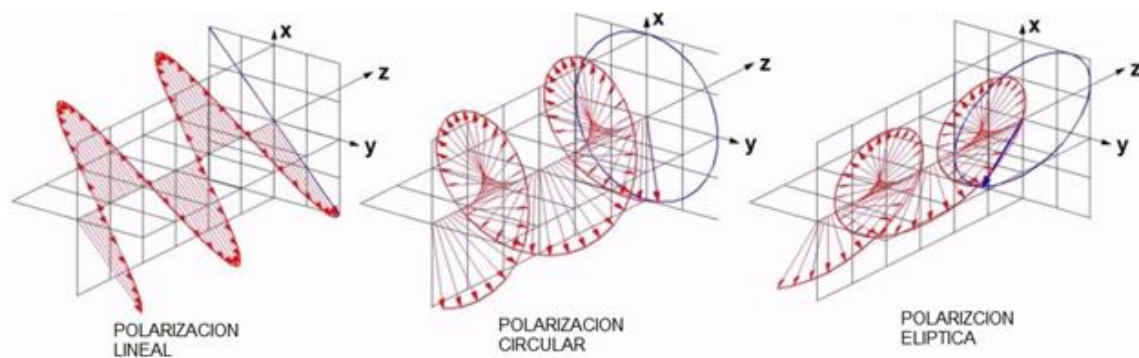


Figura 2.11. Tipos de polarizaciones en antenas.

2.7 Dipolo de Hertz

Es el tipo de antena más sencillo. También se llama dipolo eléctricamente corto, haciendo referencia a que es corto en comparación con media longitud de onda. Esta antena no se puede obtener en la realidad, pero sí sirve como base para explicar antenas más prácticas:

Tiene corriente uniforme en toda su longitud, pero se supone que la corriente varía en forma sinusoidal en función del tiempo (Vega 2007):

2.7.1 Ganancia

$$Gain = 1.5Y_{rad}sen(\theta)^2 \quad (2.14)$$

2.7.2 Alturas Efectivas

$$H(1) = 0;$$

$$H = j\lambda\sqrt{Gain}\sqrt{\frac{R_{rad}}{120\pi^2}}; \quad (2.15)$$

$$H(3) = 0;$$

2.8 Dipolo de media longitud de onda

Un dipolo de media onda es una antena formada por dos conductores de longitud total igual a la mitad de una longitud de onda. Hay que señalar que esa longitud de onda no tiene nada de remarcable eléctricamente. La impedancia de la antena no corresponde ni a un máximo ni a un mínimo. Tampoco es real, aunque por una longitud próxima (hacia $0,46\lambda$) la parte imaginaria pasa por cero. Para este caso se toma como hipótesis que la amplitud de la corriente a lo largo del dipolo tiene una forma sinusoidal (Vega 2007).

2.8.1 Ganancia

$$Gain = 1.64 * Y_{rad} * \frac{\cos(\frac{\pi}{2} * \cos(\theta))^2}{sen(\theta)^2} \quad (2.16)$$

2.8.2 Altura Efectiva

$$H(1) = 0;$$

$$H(2) = j\lambda\sqrt{Gain}\sqrt{\frac{R_{rad}}{120\pi^2}}; \quad (2.17)$$

$$H(3) = 0;$$

3 SOFTWARE , BASES TEÓRICAS DE SIMULACIÓN, ENTORNO

3.1 CINDOOR

3.1.1 Introducción Software

La herramienta utilizada para la simulación de las antenas a lo largo de este proyecto se llama *CINDOOR*. Este es un software de ingeniería para la planificación y diseño de sistemas inalámbricos en espacios cerrados, desarrollado en el Departamento de Ingeniería de Comunicaciones (DICOM) de la Universidad de Cantabria. CINDOOR permite el análisis tanto de exteriores como de interiores, incluyendo por ejemplo espacios como interiores de edificios, instalaciones subterráneas, túneles, micro y pico células urbanas.

CINDOOR se basa en un modelo de propagación de radio específico del entorno, incluye un método eficiente de trazado de rayos en combinación con modelos electromagnéticos del entorno, y emplea el enfoque de alta frecuencia llamado GO/UTD, que combina la Óptica Geométrica y la Teoría Uniforme de la Difracción.

En escenarios urbanos y de interior, los parámetros scattering pueden ser modelados en detalle, si se utilizan solamente paneles planos, facilitando de esta manera los cálculos necesarios.

Una vez conocida la distribución del espacio-tiempo, la señal se procesa para obtener los parámetros de interés para el diseño y evaluaciones del sistema. Las diferentes opciones de análisis de desempeño que se incluyen son: mapas de cobertura, estadísticas de desvanecimiento, perfil de retardo de potencia, retardo rms y coherencia del ancho de banda, por consiguiente posibilita un análisis exhaustivo de las características del modelo.

Teniendo en cuenta este modelo se puede afirmar que la comunicación de un antena transmisora con un receptora se realiza mediante diferentes mecanismos de dispersión (scattering), teniendo como mecanismo de acoplo diferentes tipos de rayos (directo, reflejado, difractado o combinaciones de ellos). Por tanto un método eficiente de trazado de rayos es indispensable para poder realizar cálculos de calidad.

El software CINDOOR ha sido de vital importancia para la realización de este trabajo, se ha utilizado el modelo real del laboratorio del Departamento de DICOM, se han podido variar los parámetros de simulación de las antenas y los resultados han podido ser extraídos y procesados de una manera práctica y exhaustiva.

3.1.2 Base Teórica Software

3.1.2.1 Método de trazado de rayos eficiente

En los últimos años se han ido desarrollando diferentes técnicas de trazado de rayos que han sido muy útiles para el análisis y diseño de sistemas inalámbricos, tanto en sistemas inalámbricos de micro-células urbanas, como en pico-células de interior. La optimización de estos avances permite que una gran cantidad de rayos (reflejados, difractados, y múltiples combinaciones de estos efectos), que llegan al receptor por múltiples caminos y contribuyen a la señal recibida, se tengan en consideración. Este nivel de precisión en el cálculo de los niveles de señal, consigue una estimación suficiente, no solamente para el nivel de señal medio, sino también para sus variaciones y por consiguiente sus estadísticas.

La capacidad de calcular la potencia media y las estadísticas locales de la señal recibida, motiva la posibilidad de obtener modelos de canales específicos que pueden tener en cuenta las variaciones del canal para diferentes localizaciones dentro del área de interés. Estos modelos del canal, utilizados en simuladores de sistemas de comunicación, pueden ofrecer una descripción detallada del comportamiento del sistema, en un ambiente particular. Gracias a este aspecto, por ejemplo se pueden obtener mapas de ratios de error de bit (BER), que pueden definir la efectividad de los resultados en cada entorno en el que los sistemas tienen que operar.

Se han conseguido diferentes opciones para obtener las estadísticas locales de desvanecimiento a partir del trazado de rayos. El implementado en CINDOOR es un modelo basado en el espectro de *Doppler*, y está demostrado que empezando por la información de la señal en un solo punto, obtenido mediante las técnicas de trazado de rayos, es posible estimar las estadísticas de la señal, en un área local de ese punto. Este aspecto tiene una importancia práctica importante, ya que reduce sustancialmente los tiempos de cálculo de las estadísticas locales. El modelo se basa según la premisa de que el campo, en una región pequeña, puede obtenerse mediante la suma de ondas planas, donde la dirección de propagación, la amplitud, y la fase de cada onda, son los rayos que llegan al punto central de la región. La diferencia con el método de estimación de las estadísticas de desvanecimiento en entornos de interior ideada por *Honcharenko* es que, el espectro *Doppler* se obtiene del plano de ondas que llegan a la antena receptora, considerando su polarización y su modelo (S. L. R. P. Torres 2001).

3.1.2.1 GO/Óptica Geométrica

Dentro del gran mundo de la Física se encuentra la Óptica Geométrica, que tiene como cometido estudiar, utilizando leyes geométricas, los cambios de direccionamiento que sufren los rayos luminosos en la reflexión y en la refracción. Las leyes geométricas más utilizadas, son las que vienen reflejadas a continuación (Colaboradores Wikipedia 2017):

Los rayos

Los rayos son líneas rectas que indican, mediante una flecha, la dirección y sentido de propagación de la onda. Estos se propagan en línea recta y con la misma velocidad en todos los puntos y en todas las direcciones.

Reflexión:

La reflexión se origina cuando un rayo de luz choca contra una superficie que le permite reflejarse. Se toma como referencia una línea perpendicular a la superficie en la que se reflejan, para poder regular los ángulos que chocan y los que salen expedidos. Por tanto la ley de reflexión nos indica que el ángulo incidente es igual al ángulo reflejado con la perpendicular al espejo:

$$\theta_r = \theta_i \quad (3.1)$$

La segunda ley de la reflexión nos indica que el rayo incidente, el rayo reflejado y la normal con respecto a la superficie reflejada están en el mismo plano se aplica:

Ley de refracción: Ley de Snell

Cuando una onda pasa de un medio a otro que tienen distintos índices de refracción, experimenta un cambio de dirección y de velocidad, la ley que describe este fenómeno se llama la Ley de Refracción (Colaboradores Wikipedia 2017).

Para calcular el índice de refracción de un medio, "n", donde c la velocidad de la luz en el vacío ($3 \cdot 10^8 \text{ms}^{-1}$) y v la velocidad de la luz en el medio:


$$n = \frac{c}{v} \quad (3.2)$$

Los índices de refracción y los ángulos de incidencia y de refracción entre dos medios se pueden relacionar mediante la relación de Snell:

$$n_1 * \text{sen}(\theta_1) = n_2 * \text{sen}(\theta_2) \quad (3.3)$$

En la que n_1 y n_2 son los índices de refracción de los dos medios, y θ_1 y θ_2 son los ángulos de incidencia y de refracción respectivamente.

Ángulo crítico

El ángulo crítico es el ángulo que produce reflexión total interna (se refleja completamente) para valores mayores de θ_1 que el θ_c (Colaboradores de Wikipedia 2017) :

$$\theta_c = \arcsen(n_2/n_1) \quad (3.4)$$

{Siendo n_1 y n_2 los índices de refracción, θ_1 el ángulo de la onda incidente, θ_2 el ángulo de la onda refractada, θ_c el ángulo crítico, }

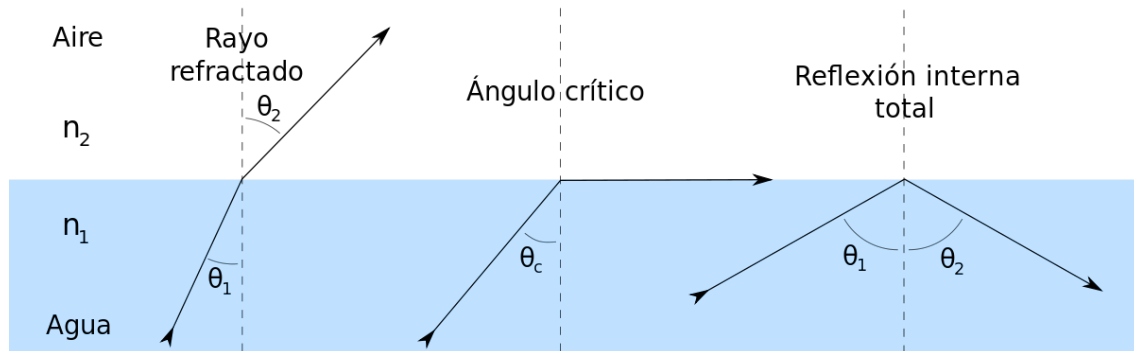


Figura 3.1. Cambios de direccionamiento de los rayos de un medio a otro.

3.1.2.2 UTD/Teoría Uniforme de la Difracción

La teoría geométrica de la difracción (UTD) es una extensión de la teoría de la geometría óptica GO, ya que esta última no tiene en cuenta la difracción. Esta teoría plantea los rayos difractados, además de los ya conocidos rayos geométricos. Estos rayos se producen cuando los rayos inciden sobre esquinas, bordes, o vértices de superficies de transición. Las leyes geométricas asumen que la luz viaja a lo largo de líneas rectas o curvadas llamadas rayos, pero no describen que los rayos, al incidir en las superficies anteriores, generan el fenómeno de la difracción. Algunos de ellos entran en las regiones de sombra y representan allí la luz, mientras que otros entran en las regiones iluminadas (Keller 1961).

La teoría UTD utiliza varias leyes de la difracción que son análogas a las leyes de reflexión y refracción. Como estas, las nuevas leyes son deducibles del principio de Fermat que dice "El trayecto seguido por la luz al propagarse de un punto a otro es tal que el tiempo empleado en recorrerlo es un mínimo". Fuera de las superficies de difracción, los rayos difractados se comportan de igual manera a los rayos normales.

Las ópticas geométricas ordinarias se utilizan normalmente para determinar las distribución de la intensidad de la luz, polarización, y fase a lo largo del espacio. Esto se puede conseguir mediante la asignación de un valor de campo a cada rayo y dejando que el campo total en un punto, sea la suma de los campos en todos los rayos, a lo largo de ese punto. La fase del campo en un rayo, se asume proporcional a la longitud óptica del rayo del mismo punto de referencia donde la fase es cero. La amplitud se asume que varía en concordancia con el principio de conservación de la energía en un tubo estrecho de rayos. La dirección del campo cuando es un vector, es dada por el vector unidad perpendicular al rayo. Este vector se desliza paralelo a el mismo, a lo largo del rayo, en un medio homogéneo, y rota alrededor del rayo en una forma específica a medida que se desliza a lo largo de el, en un medio no homogéneo.

Exactamente estos mismos principios, pueden ser utilizados para asignar un campo, para cada uno de los rayos difractados. La única dificultad ocurre a la hora de obtener el valor inicial del campo, en el punto de la difracción. En el caso de los rayos ordinarios, el campo de un rayo saliendo de una fuente, se especifica en la fuente, pero en un rayo refractado o transmitido, el valor inicial se obtiene multiplicando el campo en el rayo incidente, por un coeficiente de reflexión o transmisión. Por analogía, el valor inicial del campo en un rayo difractado, se obtiene multiplicando el campo en el rayo incidente por un coeficiente de difracción, que es la matriz del vector campo.

Los coeficientes de difracción pueden ser caracterizados reconociendo que solamente los vecinos inmediatos del punto de difracción pueden afectar su valor. De esta manera las direcciones de incidencia y difracción, la longitud de onda y las propiedades geométricas y físicas de los medios en el punto de difracción son los que los determinan.

Otro tipo de difracción, no tenida en cuenta por lo explicado hasta ahora, ocurre en un foco diferente para los rayos ordinarios o difractados. En estos lugares los rayos vecinos se intersecan y el área de la sección transversal de un tubo de rayos se vuelve cero. Por consiguiente el principio de conservación de la energía en un tubo de rayos tiende a una amplitud infinita para el campo. Para poder obtener un valor finito del campo en tales lugares, hay que introducir a la teoría expuesta un factor de corrección cáustica. Cuando el campo de un rayo pasa por una cáustica se multiplica por el factor apropiado, y se vuelve finito en la cáustica.

Cuando los rayos incidentes en la dirección de propagación de la onda incidente son oblicuos al borde de la pantalla, la onda difractada en la solución de *Sommerfeld* es cónica. Esto significa que los frentes de onda difractados son conos paralelos con el borde como su eje común. Las líneas rectas ortogonales a estos conos también parecen provenir del borde y pueden identificarse con nuestros rayos difractados. Este ejemplo sugiere la ley de difracción de borde. Un rayo difractado y el rayo incidente correspondiente, forman ángulos iguales con el borde en el punto de difracción, siempre que ambos estén en el mismo medio. Se encuentran en lados opuestos del plano normal al borde en el punto de difracción. Cuando los dos rayos se encuentran en diferentes medios, la proporción de los senos de los ángulos entre los rayos incidentes y difractados y el plano normal es el recíproco de la relación de los índices de refracción de los dos medios, este aspecto se puede apreciar en la siguiente figura:

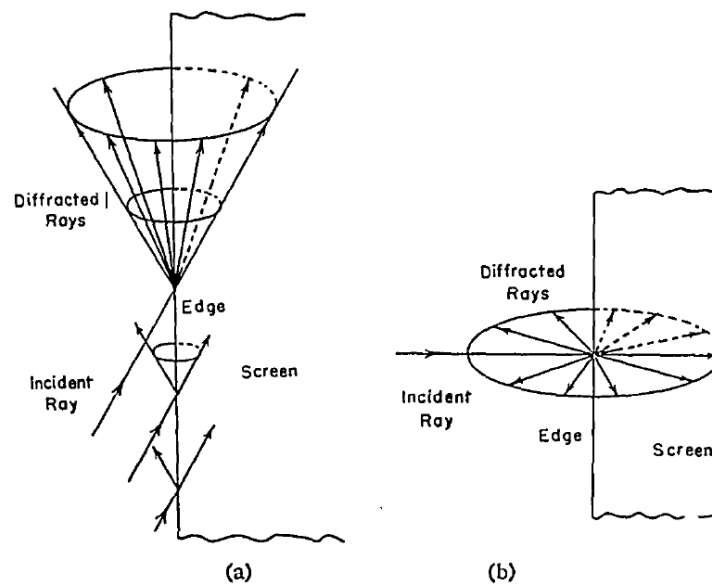


Figura 3.2. (a) El cono de los rayos difractados producido por un rayo incidente que golpea oblicuamente el borde de una pantalla delgada. (b) El plano de rayos difractados producido por un rayo que incide normalmente en el borde de una pantalla delgada.

La segunda parte de esta ley, relativa a la difracción en un medio diferente, no se sugiere en el ejemplo anterior, pero sí en la ley de refracción de Snell. Ambas partes de la ley son consecuencias de la siguiente forma modificada del principio de Fermat, que se llama principio de Fermat para la difracción de bordes. Un rayo de difracción de borde desde un punto P a un punto Q es una curva que tiene una longitud óptica estacionaria entre todas las curvas de P a Q con un punto en el borde.

La derivación de la ley de difracción de borde de este principio es particularmente simple cuando el borde es recto y ambos rayos se encuentran en el mismo medio homogéneo. Entonces es obvio que el rayo consiste en dos segmentos de línea recta que se encuentran en un punto en el borde. Rotemos el plano que contiene el

borde y el punto Q alrededor del borde hasta que contenga P. Al hacerlo, la longitud del segmento desde Q al eje no cambia, y el ángulo entre el segmento y el eje no cambia. Después de la rotación, P, Q y el borde se encuentran en un plano y la trayectoria óptica estacionaria es la que proporciona la ley de reflexión. Por lo tanto, los dos segmentos deben formar ángulos iguales con el borde y estar en lados opuestos del plano normal al borde en el punto de difracción, pero esta es la ley de la difracción de borde para rayos en el mismo medio.

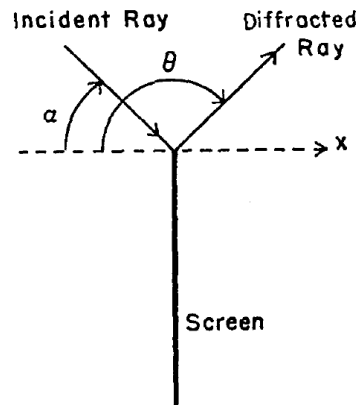


Figura 3.3. La proyección de rayos incidentes y difractados en un plano normal al borde de una pantalla. Los ángulos α y θ son aquellos entre las proyecciones y la normal a la pantalla, medidos como se muestra en la figura. El borde es normal al plano de la figura.

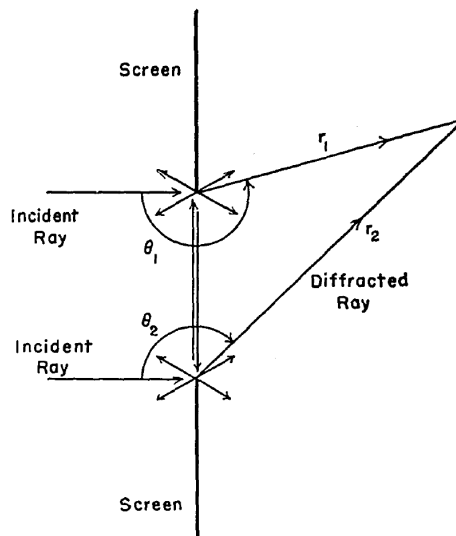


Figura 3.4. Estos son los rayos difractados producidos por una onda plana de incidencia normal, en una rendija en una pantalla delgada. Se muestran los dos rayos incidentes que golpean los bordes de la rendija, con algunos de los rayos difractados levemente que generan. Un rayo difractado de cada borde se muestra cruzando la rendija y golpeando el borde opuesto, produciendo rayos doblemente difractados.

3.1.2.3 Modelo GO/UTD de propagación radio

El modelo electromagnético considerado en CINDOOR es la combinación GO/UTD. En este enfoque, la propagación del campo electromagnético (EM) es modelado como rayos, cada rayo teniendo asignado un frente de onda, un valor vectorial del campo EM, y un término de fase. Si el campo EM es conocido en un punto Q_i , entonces se puede calcular de manera sencilla en otro punto Q_s (L. V. R. P. Torres 1999):

$$\bar{E}(Q_s) = \bar{E}(Q_i)A(s)e^{-jks} \quad (3.5)$$

Donde s es la distancia entre Q_i y Q_s , $A(s)$ es el factor de propagación que explica las pérdidas de energía a medida que el rayo se propaga y depende de la forma de la onda. Si el punto Q_i es el punto donde la antena T_x está colocada, el campo para la antena T_x se puede escribir de esta manera:

$$\bar{E}(Q_s) = \frac{\bar{K}_0 e^{-jks}}{s} \quad (3.6)$$

Donde \bar{K}_0 es una característica del tipo de antena transmisora.

Si el rayo está viajando desde una antena T_x a un punto Q_s intercepta una cara del modelo y el campo se atenúa, la expresión que tiene en cuenta este caso es:

$$\bar{E}(Q_s) = \bar{K}_0 \bar{T} \frac{e^{-jks}}{s} \quad (3.7)$$

Donde \bar{T} es la matriz del transmisor, que tiene en consideración las características del EM del plano que intercepta, el ángulo de incidencia, y la polarización.

Otro mecanismo de acoplamiento importante entre el receptor y el transmisor ocurre cuando el rayo de T_x llega al receptor después de reflectarse de una cara al punto Q_r . En este caso, el campo en el punto de recepción (Q_s) se puede calcular utilizando el conocimiento del campo impactado en el punto de reflexión:

$$\bar{E}(Q_s) = \bar{E}(Q_r) \bar{R} A'(s) e^{-jks} \quad (3.8)$$

En este caso, s es la distancia entre Q_r y Q_s , y el factor de propagación $A'(s)$ depende en general de la curvatura de la superficie. Para el caso de superficies planas, el factor de propagación es $A'(s)=1/s$. \bar{R} es la matriz de reflexión, que tiene en consideración los cambios en magnitud, fase, y polarización que sufre el campo en reflexión.

Las matrices de transmisión y reflexión, \bar{T} y \bar{R} , se pueden reducir a matrices 2x2 si el campo electromagnético se escribe en el sistema de coordenadas de rayos fijos-locales:

$$\bar{T} = \begin{bmatrix} T_{\perp} & 0 \\ 0 & T_{\parallel} \end{bmatrix} \quad \bar{R} = \begin{bmatrix} R_{\perp} & 0 \\ 0 & R_{\parallel} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Donde T_{\perp} , T_{\parallel} y R_{\perp} , R_{\parallel} son los coeficientes perpendiculares y paralelos del campo en transmisión y recepción, del plano de incidencia.

Si el transmisor y el receptor están acoplados por un rayo difractado, entonces la expresión que relata el campo difractado incidente es:

$$\bar{E}(Q_s) = \bar{E}(Q_d) \bar{D} A''(s) e^{-jks} \quad (3.9)$$

En este caso $A''(s)$ es el nuevo factor de propagación, s es la distancia entre T_x y Q_d , y \bar{D} es una matriz nueva que describe los campos anteriores y posteriores del proceso de difracción.

Si representamos la matriz de difracción cuando el campo incidente y difractado se expresan en el sistema de ejes asociados al rayo (L. V. R. P. Torres 1999):

$$\bar{D} = \begin{bmatrix} D_s & 0 \\ 0 & D_h \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

3.1.2.4 Caracterización Radio-Canal

El canal radio en interiores o áreas con mucha densidad, puede llegar a ser muy complejo. CINDOOR considera, en un primer enfoque, que el movimiento posible entre el transmisor y el receptor es lo suficientemente despacio para que el efecto *Doppler* se pueda despreciar. Entonces el canal-radio, que por definición incluye el efecto de los patrones de radio del transmisor y del receptor, puede ser considerado como un sistema lineal e invariante en el tiempo y por lo tanto está bien definido por su respuesta al impulso. Esta magnitud cambiará rápidamente moviéndose de un punto del entorno a otro en función de la trayectoria, entonces se podría considerar como una variable aleatoria con respecto a la posición \vec{r} .

La caracterización del canal dependerá del tipo de señal de interés para la transmisión. En este caso se describirá la banda-estrecha (L. V. R. P. Torres 1999).

Caracterización Banda-Estrecha

El nivel de señal de salida de la antena receptora se obtiene utilizando:

$$V_0(\vec{r}) = \sum_{i=1}^N \bar{E}(\theta_i, \phi_i) * \bar{h}_r^*(\theta_i, \phi_i) = \sum_{i=1}^N |V_i| e^{j\phi_i} \quad (3.11)$$

Donde $V_0(\vec{r})$ es el voltaje en valor complejo en los terminales de la antena cuando se transmite la frecuencia portadora f_0 , $\bar{E}(\theta_i, \phi_i)$ es el campo incidente en la antena receptora de la dirección (θ_i, ϕ_i) , N es el número de rayos incidentes de las diferentes direcciones, y $\bar{h}_r^*(\theta_i, \phi_i)$ es el vector de la altura equivalente de la antena R_x , que tiene en consideración su polarización y su ganancia directiva.

La potencia se puede calcular conociendo el voltaje $V_0(\vec{r})$ y la carga R_L :

$$P_L(\vec{r}) = \frac{1}{2} \frac{|V_0(\vec{r})|^2}{4R_L} \quad (3.12)$$

Donde R_L es la parte real de la impedancia de carga.

Tanto $V_0(\vec{r})$ como $P_L(\vec{r})$ son magnitudes bajo el efecto de multi-camino, y por lo tanto presentan un rápido desvanecimiento con máximo y mínimo a distancias alrededor de $\lambda/2$.

(L. V. R. P. Torres 1999)

3.1.2.5 Modelado geométrico y electromagnético.

La aplicación de un enfoque de alta frecuencia o de rayos para analizar el proceso de propagación de radio se basa en el supuesto de una modelo geométrico y electromagnético del entorno. Un modelo construido con facetas planas o placas (con tres o cuatro vértices) para representar escenarios urbanos e interiores es muy adecuado, ya que las superficies planas son los elementos más abundantes en tales entornos. Por lo tanto, los bordes entre pares de estas superficies también pueden ser considerados en un modelo de faceta-borde, que ayuda tanto al uso del enfoque GO / UTD y la aplicación de la teoría de la imagen a la velocidad hasta el trazado de rayos (L. V. R. P. Torres 1999).

Para utilizar el código presentado en este documento, el diseño geométrico del modelo del escenario a analizar, se puede construir utilizando cualquier paquete comercial de diseño geométrico asistido por computadora (CAGD) soportando la opción estándar de exportación de archivos DXF. Sin embargo, porque todo lo que el usuario necesita son las coordenadas del vértice de cada una de las placas, este archivo se puede escribir con el formato necesario usando cualquier editor de texto. Además, el usuario no necesita usar un paquete CAGD si el modelo geométrico está escrito en un archivo con el formato específico de CINDOOR.

Una vez que se construye el modelo geométrico, el usuario debe especificar las propiedades eléctricas (la constante dieléctrica, conductividad, estándar de desviación de la rugosidad superficial y del coeficiente de transmisión y el ancho de la pared) de cada placa. Los valores para estas propiedades son almacenados en un archivo externo que se puede cambiar con cualquier editor de texto, siempre que el formato se mantenga estrictamente. Es posible no solo almacenar los valores predeterminados, sino también se puede crear una biblioteca de los valores más comunes que se utilizarán en otras partes del programa. Adicionalmente, cualquier valor puede ser introducido directamente desde el teclado.

Debido a que en la mayoría de los casos, hay muchas placas hechas del mismo material, el usuario puede en primer lugar asignar los mismos valores de propiedades eléctricas a todas las placas del modelo, modificando los otros en una etapa posterior. CINDOOR permite al usuario hacer esto simplemente seleccionando las placas en una representación del modelo en la pantalla, y escribiendo (o seleccionando entre los disponibles) los valores. Las propiedades geométricas también pueden modificarse de esta manera, pero solo es aconsejable introducir pequeños cambios. En otros casos, es más rápido y seguro usar un paquete CAGD, o cambiar el archivo DXF directamente. La misma geometría del modelo puede ser utilizada para generar diferentes modelos eléctricos, cambiando los materiales de los que están hechas las placas, ya que pueden ser almacenados en diferentes archivos.

El programa toma la información en los bordes de este modelo geométrico para calcular los efectos de difracción. Debería tenerse en cuenta que los bordes aparecen cuando dos placas comparten dos vértices.

El modelo también debe representar las características electromagnéticas del medio ambiente. Los principales elementos en los escenarios que son particiones, paredes, techos y pisos, son normalmente una combinación de varios materiales, formando diferentes estructuras. La propagación de ondas a través de tales estructuras es un proceso complejo. Eso no puede ser analizado rigurosamente dentro de un programa de propósito general. Por lo tanto, los modelos simples de estas estructuras son necesarios para calcular campos transmitidos y reflejados mediante expresiones de forma cerrada.

Un modelo comúnmente considerado consiste en representar un obstáculo complejo, o una estructura multicapa. En los modelos simplificados, cada capa es una losa dieléctrica homogénea. Las propiedades electromagnéticas de cada capa en el modelo, son propiedades efectivas, y es esencial que los campos reflejados y transmitidos sean los mismos que en el obstáculo real. A veces la estructura real puede ser representada bastante bien como una sola capa homogénea. Si el interés es solo en el campo reflejado, como sucede en los cálculos de cobertura en exteriores/urbanos, el modelo se puede simplificar aún más. En este caso, se puede usar un modelo que considera que la pared es una interfaz entre dos medios ilimitados. Al combinar estos modelos de manera apropiada, una gran cantidad de diferentes entornos pueden ser analizados. También es posible analizar la interacción entre entornos interiores y exteriores.

Hay varias formas de asignar propiedades efectivas a los modelos simplificados. Se asigna una media espacial de las propiedades, de los diferentes materiales, haciendo caso omiso de la compleja estructura del obstáculo. Sin embargo, una mayor simplificación es posible, si al conjunto de la estructura se le asigna la constante dieléctrica y la conductividad del material más abundante. Cuando los muros y tabiques tienen una estructura interna con periodicidad resonante, esto puede influir fuertemente el campo disperso. En tales casos, un modelo más riguroso, basado en la técnica de homogeneización, puede considerarse.

3.1.3 Estructura de los archivos generados por CINDOOR

A lo largo de este apartado se van a describir los archivos a utilizar, generados por CINDOOR al simular. Estos archivos tienen un formato específico y para poder trabajar con ellos es importante conocer como se distribuyen. Una vez conocida su distribución, mediante procesamiento de datos se seleccionará la información deseada, para su futura utilización en el proyecto.

3.1.3.1 Archivo Datos.out

Este es el archivo de salida principal. Comienza describiendo las características del transmisor (posición, potencia de transmisión, resistencia de radiación, posición de los ángulos theta y phi de las antenas), después describe el receptor (tipo de antena, resistencia de radiación, resistencia de pérdidas, posición de los ángulos theta y phi de las antenas). Los últimos datos de entrada son la frecuencia de operación, los campos analizados, puntos donde se han realizado los cálculos y por último el tiempo de CPU. Un ejemplo del formato de este archivo se muestra en las siguientes líneas:

```
Program  C I N D O O R
```

```
Transmitter locations:
```

```
0.510000E+02,0.420000E+02,0.300000E+01
```

```
Transmitter power: 0.100000E-02 Watts
```

```
Radiation resistance:0.376991E+03 Ohms
```

```
Positioning THETA:0.000000E+00, PHI:0.000000E+00
```

```
Receiving antenna: Lambda/2 Dipole
```

```
Radiation resistance:0.730000E+02 Ohms
```

```
Loss resistance: 0.000000E+00 Ohms
```

```
Positioning THETA:0.000000E+00, PHI:0.000000E+00
```

```
Frequency:0.900000E+03 MHz
```

```
Fields analyzed:
```

```
Direct field
```

```
1st reflectio
```

```
2nd reflection
```

```
Calculation in one point:
```

```
0.800000E+02,0.460000E+02,0.150000E+01
```

```
CPU Time:0.530625E+00 seconds
```

```
R E S U L T S
```

```
0.800000E+02, 0.460000E+02, 0.150000E+01
```

```
0.525200E+01,0.116452E+03    0.153343E+01,0.107002E+03
```

```
0.203793E+02,0.983926E+02    0.620588E-05
```

```
Impulse response
```


20
0.977099E-07 0.883898E+00 0.291994E+03 0.870668E+02 0.187853E+03 Direct -.252282E-06 -.963955E-07 0.774818E+01 0.312954E+01 -.810704E-07 -.337970E-07
0.113188E-06 0.713487E+00 0.133544E+03 0.874682E+02 0.167444E+03 1st reflection -.134228E-06 -.150556E-06 -.488686E+01 -.464465E+01 -.545141E-02 -.384414E-01
0.279102E-06 0.266286E+00 0.193228E+03 0.889735E+02 0.305508E+02 2nd reflection 0.105146E-07 -.456760E-07 0.575082E+00 -.244653E+01 -.276073E-02 0.317656E-02
0.129335E-06 0.397185E+00 0.288146E+03 0.609621E+02 0.167444E+03 2nd reflection -.346029E-06 -.801891E-08 0.430575E+01 0.141116E+01 0.157284E+00 0.364301E+00
0.148107E-06 0.481760E+00 0.153379E+03 0.880654E+02 0.246927E+03 2nd reflection -.192485E-07 -.350161E-07 -.203862E+01 -.406729E+01 -.657508E-02 0.302465E-01
0.114068E-06 0.308617E+00 0.153269E+03 0.975563E+02 0.167444E+03 2nd reflection -.115608E-06 -.155207E-06 -.132665E+01 -.263425E+01 -.103713E+00 0.463792E-01
0.272562E-06 0.280108E+00 0.333464E+03 0.889489E+02 0.222778E+02 1st reflection 0.701409E-07 0.139927E-06 0.118109E+01 0.236519E+01 -.146133E-03 0.512278E-03
0.243587E-06 0.296986E+00 0.178493E+03 0.888238E+02 0.224080E+03 2nd reflection -.559903E-08 -.148172E-06 -.737431E-01 -.280219E+01 -.387044E-02 0.515854E-02
0.116031E-06 0.465372E+00 0.103844E+03 0.572454E+02 0.187853E+03 1st reflection 0.321147E-06 0.102613E-06 -.543214E+01 -.133868E+01 0.109427E-05 0.276542E-06
0.279653E-06 0.153868E+00 0.165537E+03 0.770274E+02 0.222778E+02 2nd reflection 0.184025E-07 0.726106E-07 -.376520E+00 -.145979E+01 0.180311E-02 -.338626E-02

En la segunda parte del archivo vienen reflejados los resultados obtenidos. El número que está colocado después del texto “Impulse response” se refiere a la totalidad de las filas de simulación resultantes. A continuación vienen reflejadas diferentes columnas que representan los siguientes valores:

Del archivo de la simulación con la antena isotrópica en recepción se deben leer los siguientes datos:

- Tiempo de llegada de cada rayo.
- Módulo del voltaje de cada rayo.
- Fase del voltaje de cada rayo.
- Componente theta de la dirección de llegada de cada rayo.
- Componente phi de la dirección de llegada de cada rayo.
- Tipo de rayo: Directo o reflexión de grado x.
- Dirección X: Componente X de la dirección de llegada de cada rayo a la antena receptora.
- Dirección Y: Componente Y de la dirección de llegada de cada rayo a la antena receptora.
- Dirección Z: Componente Z de la dirección de llegada de cada rayo a la antena receptora.
- Parte real de la componente X del campo (CAMPO) de llegada a la antena receptora en coordenadas cartesianas.
- Parte imaginaria de la componente X del campo de llegada a la antena receptora en coordenadas cartesianas.
- Parte real de la componente Y del campo (CAMPO) de llegada a la antena receptora en coordenadas cartesianas.
- Parte imaginaria de la componente Y del campo de llegada a la antena receptora en coordenadas cartesianas.

- Parte real de la componente Z del campo (CAMPO) de llegada a la antena receptora en coordenadas cartesianas.
- Parte imaginaria de la componente Z del campo de llegada a la antena receptora en coordenadas cartesianas.

Las últimas dos componentes debido a falta de espacio se reflejan después de un salto de línea.

z

3.2 Matlab

3.2.1 Obtención, procesamiento y utilización de los datos necesarios

A partir del archivo de salida datos.out, obtenido al realizar la simulación por CINDOOR, se procede a seleccionar los datos que se van a necesitar. Los valores que interesan son: tiempo de retardo, magnitud de la tensión, fase de la tensión, direcciones x, y, z, y las magnitudes reales e imaginarias de los campos X, Y, Z.

Como se ha podido ver anteriormente, el archivo datos.out, tiene además de los datos de simulación, otros datos que en este caso no son necesarios y por tanto no se van a tener en cuenta. Para poder seleccionar los datos necesarios se observó el archivo y se pudo apreciar que hay una frase que se repite en todos los archivos, esta frase es: "*Impulse response*". A continuación se programó un código con MatLab, mediante el cual se detectara esa frase y después de dos líneas de la localización de la frase se empezara a guardar e adjudicar los valores, a las diferentes variables.

Una vez cargados los datos obtenidos de la simulación de la antena isotrópica en las variables, se procede a trabajar con ellos para que en un final se puedan caracterizar las antenas que se desee.

El archivo inicial hace referencia a los valores que se obtienen al procesar mediante CINDOOR, una antena Isotrópica. Esta antena es teórica, es imposible de realizar físicamente, pero, sirve de gran ayuda, debido a sus características, ya que a partir de ella, se pueden generar modelos reales. La antena Isotrópica es un tipo de antena que irradia 360° y que tiene un diagrama de radiación esférico. Por tanto no importa el punto que se quiera analizar, ya que siempre se va a recibir la misma cantidad de señal.

Con los datos de la antena Isotrópica cargados en variables vectoriales, se puede proceder a caracterizar las antenas que se deseen. En un principio se trabajará con las antenas: 'Dipolo de Hertz' y el 'Dipolo Lambda medios'. El procedimiento que se llevará a cabo para caracterizar las demás antenas se relatará en el capítulo 4.

Una vez hecha la caracterización de la antena en cuestión, se genera un archivo con los valores del tiempo de llegada de cada rayo y el voltaje resultante en la antena receptora, obteniendo por tanto la respuesta impulsiva.

3.2.2 Desarrollo de una aplicación mediante App Designer

Cuando se realiza un proyecto se tiene que tener siempre en cuenta la eficiencia y la organización. Como a lo largo de este trabajo se iban a realizar gran cantidad de simulaciones y se iban a generar gran cantidad de archivos, se consideró oportuno, desarrollar una aplicación que ayudara en términos de sencillez, eficiencia y organización. Cada uno de los archivos resultantes de las simulaciones, tiene que ser procesado y los datos que se obtienen, se tienen que interpretar mediante diferentes tipos de gráficas o figuras. La posibilidad de cambiar los parámetros sin tener que modificar código y además poder cargar y guardar los archivos de una forma organizada e intuitiva, hacen que esta aplicación sea una herramienta bastante práctica e útil.

Esta aplicación fue desarrollada con la ayuda de la herramienta “APP Designer” del programa “MatLab”. A continuación se puede ver reflejada la interfaz gráfica de la aplicación:

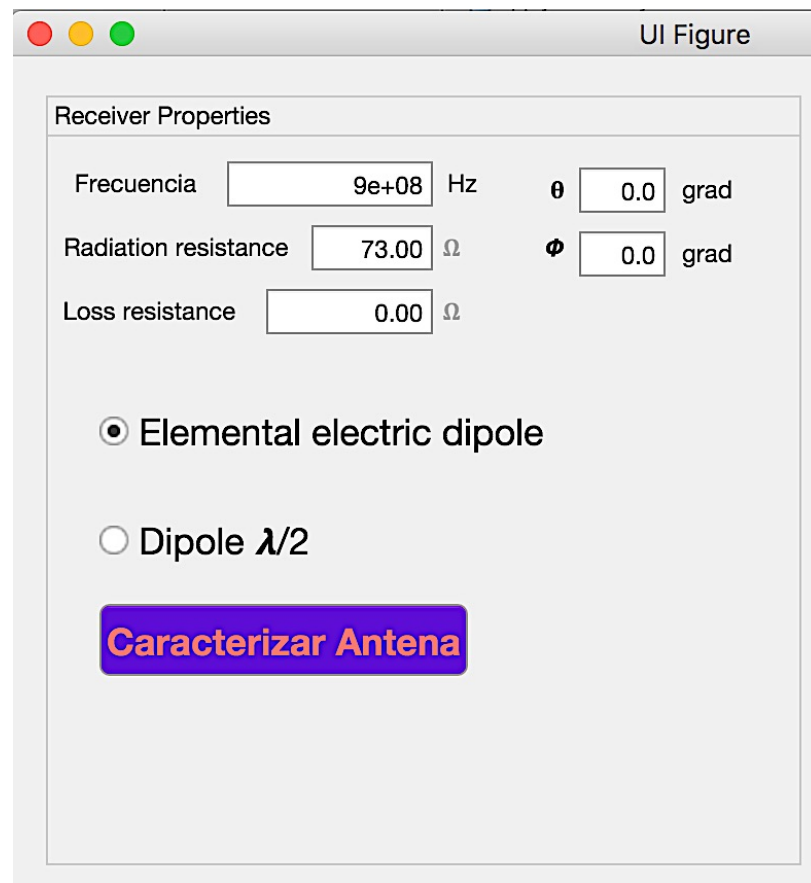


Figura 3.1. Interfaz Aplicación.

Como se puede apreciar, solamente se dispone del bloque de la antena receptora. Esto es debido a que el transmisor en este proyecto será fijo y solamente se cambiarán los tipos de antenas receptoras y sus propiedades. La aplicación permite la introducción de diferentes propiedades de la antena Rx, estas son: la frecuencia en Hertzios, la resistencia de radiación en Ohmios, la resistencia de pérdidas también en Ohmios y los ángulos Theta e Phi de colocación de la antena receptora en grados.

Una vez introducidas las propiedades de la antena, se prosigue eligiendo el tipo de antena que se quiera caracterizar y se presiona el botón "Caracterizar Antena", para realizar los cálculos pertinentes. A continuación salta una ventana en la que se tiene que elegir el archivo generado por CINDOOR de la antena isotrópica y después de cargarlo salta otra ventana en la que se tiene que indicar el nombre del archivo final y el directorio en dónde se quiere guardar el mismo.

Al acabarse la simulación también se genera una figura gráfica que refleja la respuesta impulsiva de la antena que se ha querido caracterizar, esta figura se puede guardar en varios tipos de formatos y en el directorio que se prefiera.

Las aplicaciones resultantes de "App Designer" se pueden transferir entre usuarios, permitiendo ser utilizadas por cualquier persona que disponga del compilador de "MatLab". Por tanto es una herramienta que además de ahorrar tiempo, es bastante útil a la hora de organizar los archivos utilizados y en consecuencia en mejorar la eficiencia.

Al utilizar esta aplicación, un usuario puede cargar, simular y distribuir los archivos resultantes de una manera fácil, eficaz y organizada, sin tener que cambiar código en ningún caso. Dado que se han tenido que realizar gran cantidad de simulaciones, al disponer de esta herramienta, el cómputo general de tiempo de trabajo se vio reducido notoriamente y los archivos están organizados de una forma estipulada y entendible. Si en un futuro se quieren ampliar las funciones de esta aplicación, las nuevas opciones se pueden incorporar de manera sencilla, pudiendo de esta forma darle a la aplicación, la versatilidad que se necesite.

3.3 Entorno de Simulación

En este capítulo vienen reflejados los planos del lugar en donde se van a realizar las simulaciones de las antenas. El lugar elegido es el laboratorio del *Departamento de Comunicación (GISAR)* de la *Universidad de Cantabria*. En los planos se reflejan tanto los tipos de materiales de los que están hechos los objetos presentes en la sala, como sus dimensiones. El material del cual están compuestas las paredes o los objetos de la sala, es una característica muy importante a tener en cuenta, ya que la señal traspasa o se refleja en un material de una forma u otra, dependiendo de la composición del mismo.

A continuación viene expuesto el plano general de la sala, con el objetivo de poder obtener una idea general de la distribución:

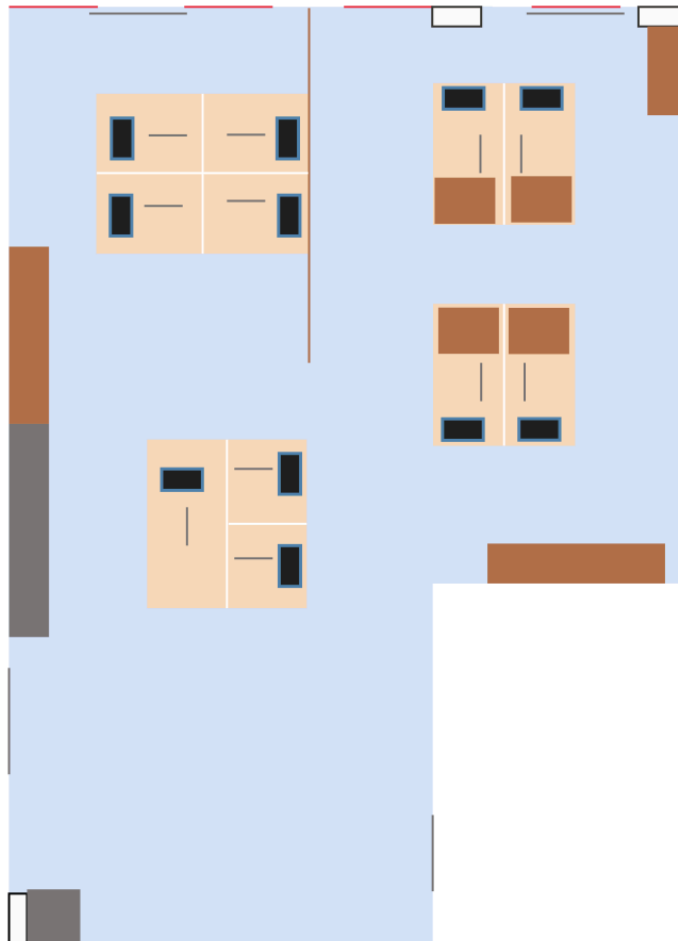


Figura 3.5. Plano laboratorio con objetos

A partir de la imagen anterior se puede apreciar a grandes rasgos el diseño del laboratorio, en la siguiente ilustración viene reflejada la información relacionada con los diferentes objetos que hay colocados por el laboratorio y los que están empotrados en la pared, indicando el material del que están compuestos y las dimensiones que tienen:

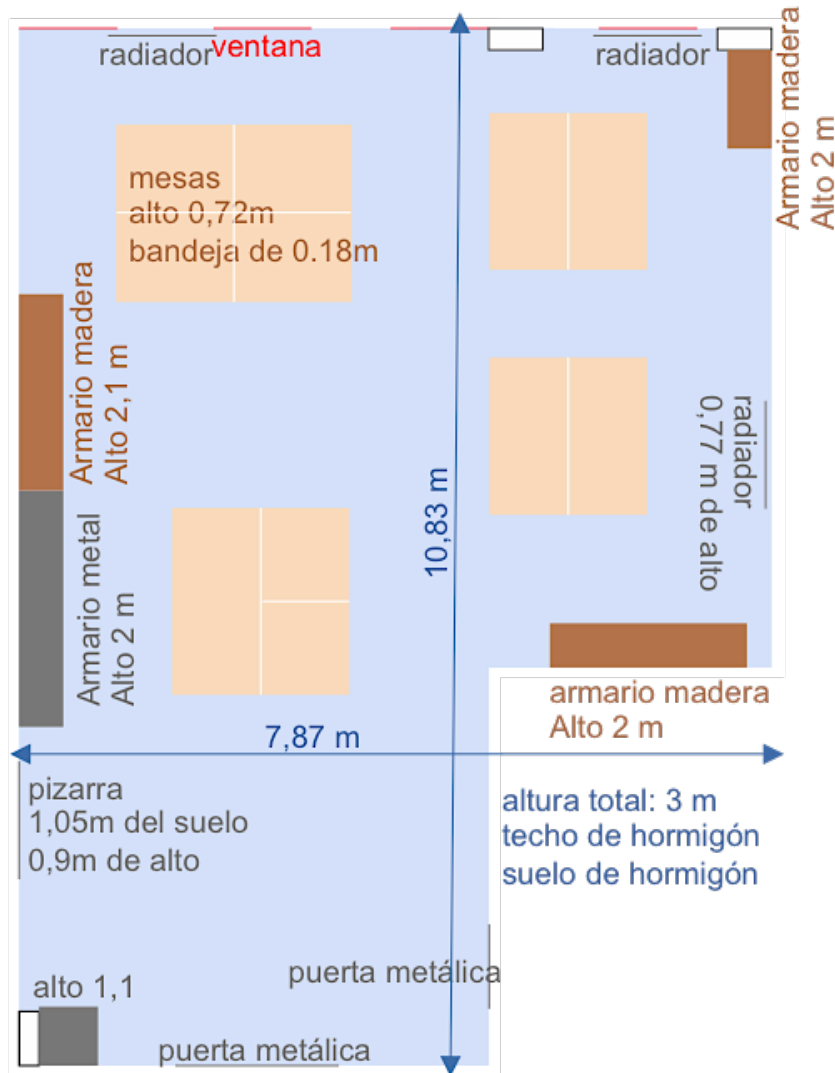


Figura 3.6. Dimensiones paredes y objetos.

La altura de la sala es de 3 m, posteriormente en el apartado de simulación se reflejarán las posiciones tridimensional en las que se han colocado tanto el transmisor como el receptor, y se irán cambiando por la superficie disponible.

Con el objetivo de obtener una mejor visualización de esta sala, a continuación viene reflejado el plano tridimensional que la describe. Este es el plano que se utiliza en las simulaciones de CINDOOR. A la hora de diseñar el plano, todos los materiales, objetos, mobiliario, paredes que hay incluidos tienen una constante dieléctrica asignada, con el objetivo de conseguir una similitud alta entre las simulaciones y la realidad:

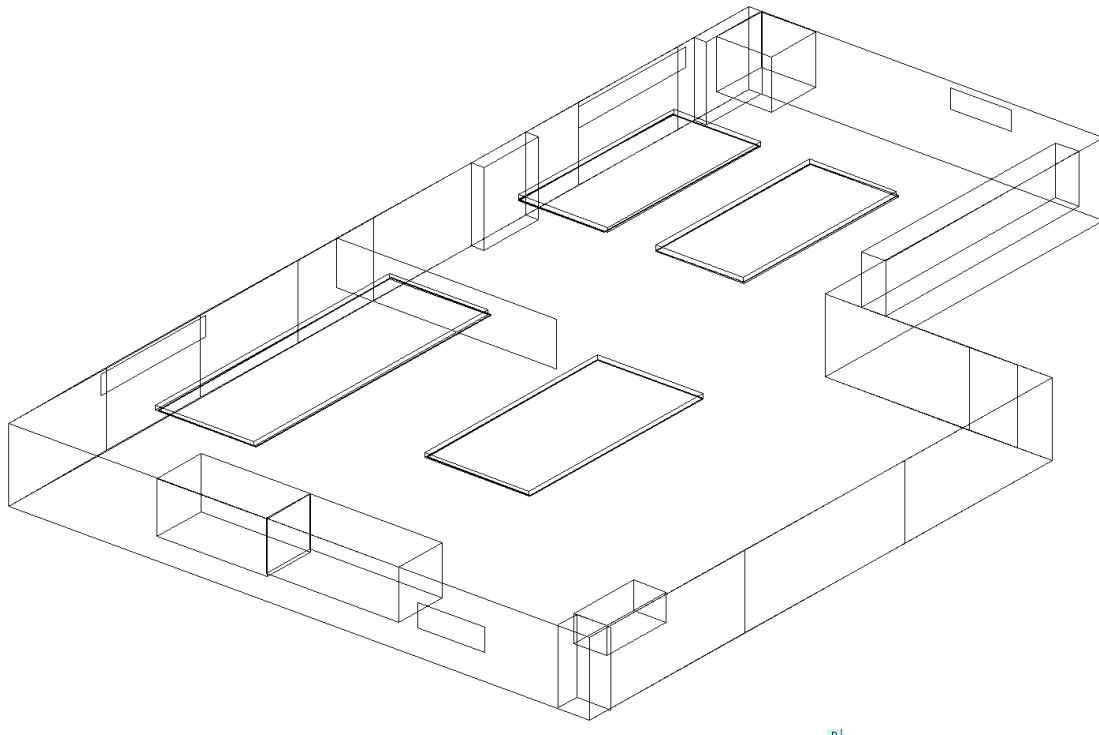


Figura 3.7. Visualización tridimensional laboratorio.

4 REALIZACIÓN E INTERPRETACIÓN DE LAS SIMULACIONES

En este capítulo se reflejarán los resultados obtenidos de las simulaciones llevadas a cabo, explicando las opciones elegidas, representando los resultados obtenidos y tomando conciencia de la veracidad de resultados finales. Se expondrán las diferentes opciones disponibles a elegir, y se constatarán con los resultados obtenidos en CINDOOR, para así ver el grado de similitud de las mismas. Una vez tomada la conciencia de los resultados, se relatarán los impedimentos experimentados, qué cambios se han tenido que realizar debido a ellos y qué limitaciones al proyecto inicial suponen. En un final se comparará el cómputo de los resultados obtenidos con los objetivos propuestos en un principio, se reflejarán los que han proporcionado resultados correctos y se compararán los tiempos de simulación de la aplicación desarrollada con los tiempos que se necesitarían si se utilizara el modelo tradicional, dando en un final un resultado concreto de si es beneficioso o no, el hecho de utilizar este procedimiento.

4.1 Métodos y cálculos llevados a cabo

4.1.1 Carga de los datos e asignación de variables

En un principio se lee el archivo de simulación de la antena isotrópica proporcionado al simular CINDOOR. Se eliminan los datos que no sean necesarios y se cargan los que se vayan a utilizar, en diferentes variables.

De la aplicación desarrollada con MatLab, se leen los parámetros de la antena receptora, siendo estos: los ángulos Θ e Φ (ángulos de la antena receptora con respecto al sistema absoluto), la frecuencia de operación y las resistencias de radiación y pérdidas. Las partes reales e imaginarias del campo se juntan y después se cargan en una matriz columna llamada "ENT_CAMPO". Los ángulos leídos de la aplicación al haberse leído en grados, se cambian a radianes y se cargan en una lista llamada "ENT_ABS". Las posiciones x , y , z también se cargan en una matriz columna llamada "ENT_POS".

4.1.2 Cambio de las direcciones y campos en el sistema de ejes de la antena receptora

La antena receptora puede estar girada, siendo este, un factor muy importante a tener en cuenta, ya que si no se tiene, los resultados no serían correctos. Para girar las posiciones y los campos, en el sistema de la antena receptora, se tienen que realizar una serie de cálculos, siendo estos los descritos a continuación:

- Primero se tiene que obtener la matriz de rotación, para ello se ha desarrollado la siguiente función:

$$[P_ABS_R]=SIST_ANT_R(ENT_ABS) \quad (4.1)$$

Esta subrutina calcula un sistema de coordenadas local a la antena receptora. Obtiene también la matriz de transformación, de una dirección, en el sistema absoluto (P_ABS_R), obteniéndose una matriz 3x3, como se puede apreciar a continuación:

$$P_ABS_R = \begin{pmatrix} P_ABS_R(1,1) & P_ABS_R(1,2) & P_ABS_R(1,3) \\ P_ABS_R(2,1) & P_ABS_R(2,2) & P_ABS_R(2,3) \\ P_ABS_R(3,1) & P_ABS_R(3,2) & P_ABS_R(3,3) \end{pmatrix}; \quad (4.2)$$

- Segundo, dado que todos los cálculos deben hacerse en el sistema local asociado a la antena receptora, se debe poner la dirección de llegada a la antena en el sistema de ejes de la antena. Esto se hace multiplicando por la matriz de transformación P_ABS_R. El resultado será una dirección en cartesianas, en el sistema de la antena. Esto debe hacerse para todas las direcciones de llegada, tantas como rayos:

$$\begin{pmatrix} DirAntX \\ DirAntY \\ DirAntZ \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_ABS_R(1,1) & P_ABS_R(1,2) & P_ABS_R(1,3) \\ P_ABS_R(2,1) & P_ABS_R(2,2) & P_ABS_R(2,3) \\ P_ABS_R(3,1) & P_ABS_R(3,2) & P_ABS_R(3,3) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} DirX \\ DirY \\ DirZ \end{pmatrix}; \quad (4.3)$$

Tercero, el mismo proceso de transformación se debe hacer para CAMPO, una vez para cada campo asociado a cada rayo. Primero se pone en cartesianas en el sistema de la antena multiplicando por P_ABS_R:

$$\begin{pmatrix} CAMPOAntX \\ CAMPOAntY \\ CAMPOAntZ \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_ABS_R(1,1) & P_ABS_R(1,2) & P_ABS_R(1,3) \\ P_ABS_R(2,1) & P_ABS_R(2,2) & P_ABS_R(2,3) \\ P_ABS_R(3,1) & P_ABS_R(3,2) & P_ABS_R(3,3) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} CAMPOX \\ CAMPOY \\ CAMPOZ \end{pmatrix}; \quad (4.4)$$

Al haber hecho estos pasos, tanto las direcciones, como los campos de llegada a la antena, están en el sistema de ejes de la antena receptora.

Un requerimiento indispensable es que las operaciones se realicen entre valores con el mismo tipo de coordenadas y debido a eso se han desarrollado unas funciones que tienen el objetivo de cambio de coordenadas, y cada vez que se necesiten con simplemente hacer una llamada a la función, se podrían utilizar. Los cálculos dedicados para realizarlo son los siguientes:

a) Cálculo de las coordenadas esféricas (r, θ, φ) de la dirección anterior mediante la función ANGULAR. Del resultado se seleccionan solamente las dos últimas coordenadas: THETA y PHI.

b)Cálculo del campo en esféricas en el sistema asociado a la antena receptora mediante la función CARTESF. Con este proceso se obtiene SAL_CAMPO.

4.1.3 Caracterización de las antenas

Para cada dirección de llegada (para cada rayo) se tiene que calcular la ganancia del mismo y utilizando este valor, se procede a calcular la altura efectiva de la antena receptora en coordenadas esféricas:

4.1.3.1 Cálculo de la ganancia G

G =ecuación característica de cada antena;

4.1.3.2 Cálculo de la altura efectiva H

$H_r=0$;

$H_{\text{Theta}}=j^*(\text{ecuación característica de cada antena})$

$H_{\text{Phi}}=0$;

4.1.4 Cálculo del voltaje de cada dirección de llegada (de cada rayo)

El voltaje se calcula multiplicando escalarmente los vectores del campo en esféricas y el conjugado de la altura efectiva en esféricas. El resultado es un número complejo con módulo y fase. El módulo de este voltaje es el resultado final, junto con el tiempo de llegada de cada rayo que se leyó en el archivo, al principio de todo este proceso. En definitiva, se ha calculado la respuesta impulsiva que se obtiene con la antena que se haya seleccionado en la aplicación de MatLab (actualmente, solo un dipolo de Hertz o u dipolo $\lambda/2$, se pueden añadir más en el futuro).

4.2 COMPROBACIÓN DE RESULTADOS

Anteriormente se ha obtenido la respuesta impulsiva para una determinada antena receptora, sin necesidad de utilizar CINDOOR. Pasos para comprobar que los resultados son correctos:

- Realizar una simulación con CINDOOR en la que se utilice una antena isotrópica en recepción. La antena transmisora puede ser cualquiera. Esta operación es siempre obligatoria ya que proporciona todos los datos que se leen en el primer punto del proceso explicado anteriormente.
- Ejecutar la aplicación desarrollada en MatLab.

- Dibujar la respuesta impulsiva calculada (módulo del voltaje frente a tiempo de llegada) en el último punto del proceso anterior.
- Para comprobar que eso es lo que debería salir, se realiza una nueva simulación con CINDOOR manteniendo la misma antena transmisora pero cambiando la receptora: se quita la isotrópica y se pone la misma que se haya seleccionado en la aplicación de MatLab.
- Se dibuja la respuesta impulsiva de esta segunda simulación leyendo el archivo correspondiente de la misma forma que se hace en el primer punto del proceso anterior. La información está contenida en las dos primeras columnas (solo es necesario leer los dos primeros parámetros de ese primer punto anterior). Lo que se ha leído es la respuesta impulsiva que se obtiene para la antena seleccionada. Se representa esta respuesta impulsiva.
- Los resultados serán correctos si las dos respuestas impulsivas representadas son iguales. Para comprobar que los resultados son iguales, además de obtener una gráfica de la respuesta impulsiva, reflejando el resultado obtenido y el deseado en diferentes colores, también se realiza una gráfica que refleje la división entre el Voltaje obtenido y el Voltaje deseado, si el resultado es una línea horizontal de valor 1 significa que los dos valores coinciden y por tanto se verifica la certitud de los resultados obtenidos. Este par de gráficas se realizarán para cada caso en concreto.
- Se van a realizar varias parejas de simulaciones (CINDOOR + MatLab) y (CINDOOR) de la forma que se ha detallado en todos los puntos anteriores. Cuando todas estas simulaciones den los mismos resultados se puede concluir que la aplicación desarrollada es válida y no será necesario realizar la segunda simulación de CINDOOR en el futuro.

4.3 Realización e interpretación de las simulaciones

En este apartado se van a exponer las diferentes simulaciones llevadas a cabo utilizando la aplicación desarrollada. El lugar de simulación se ha descrito en el capítulo 3 y en el subcapítulo “Entorno de Simulación” y para comprobar los resultados, se analizarán diferentes casos en los que se cambiarán las posiciones de las antenas y los ángulos de posicionamiento de la antena receptora.

El método por el cual se hacen las comprobaciones de las simulaciones se ha descrito en el apartado 4.3 *Comprobación de Resultados*. En este apartado se van a exponer diferentes casos prácticos de simulación. Los valores que se van a cambiar son, los tipos de antenas, las posiciones de las dos antenas Tx y Rx y los ángulos de colocación de la antena Rx. Con el objetivo de proporcionar suficiente información como para poder dar veracidad a lo expuesto, para cada caso de posicionamiento de las antenas se expondrá una ilustración con la colocación de las antenas, una tabla con los parámetros de simulación y para finalizar vendrán reflejadas dos gráficas, una reflejará la Respuesta Impulsiva de la simulación junto con la Respuesta Impulsiva obtenida por CINDOOR, y la otra reflejará la relación entre el Voltaje Obtenido/ Voltaje Deseado en recepción.

4.3.1 Parámetros Generales de Simulación

La siguiente tabla refleja los parámetros de entrada generales para las siguientes simulaciones:

Tabla 2 Características y valores Caso 1.

Antena Transmisora	Dipolo Lambda Medios
Potencia de Transmisión	1mW
Frecuencia Operación	900 MHz
Resistencia de Radiación	73 Ohms
Resistencia de Pérdidas	0 Ohms
Campos Analizados	Direct field, 1st reflection, 2nd reflection, 3rd reflection, 1st diffraction

4.3.1.1 Posicionamiento 1

Tabla 3 Valores Posicionamiento 1.

Posicionamiento Antena Tx (rojo)	X=38; Y=30; Z=2.8
Posicionamiento Antena Rx (azul)	X=2.9; Y=14; Z=1.6

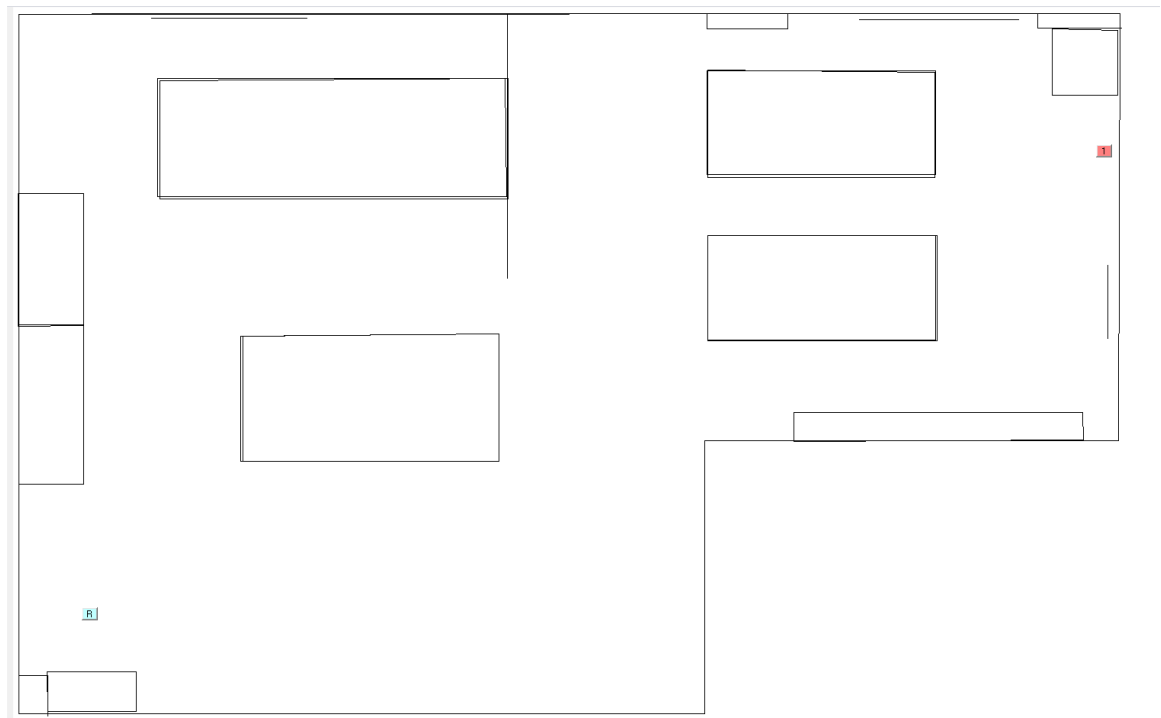


Figura 4.1. Posicionamiento antenas 1.

Tipo Antena Rx: Dipolo de Hertz; Ángulos Rx: THETA=35°, PHI=45°

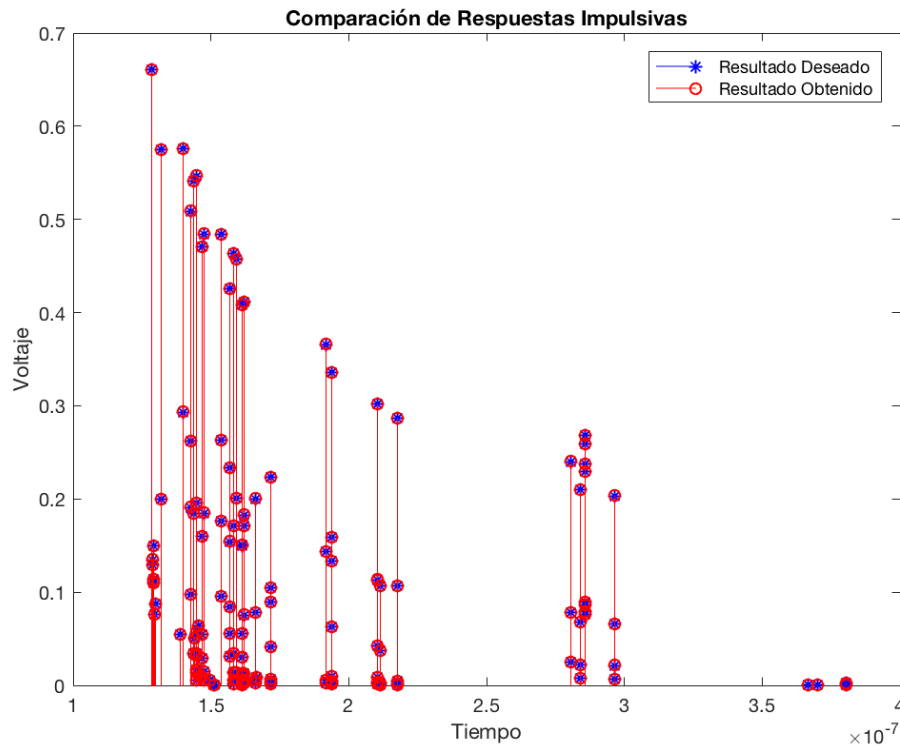


Figura 4.2. Respuesta Impulsiva Dipolo de Hertz ángulos Rx: $\theta=35^\circ$; $\phi=45^\circ$.

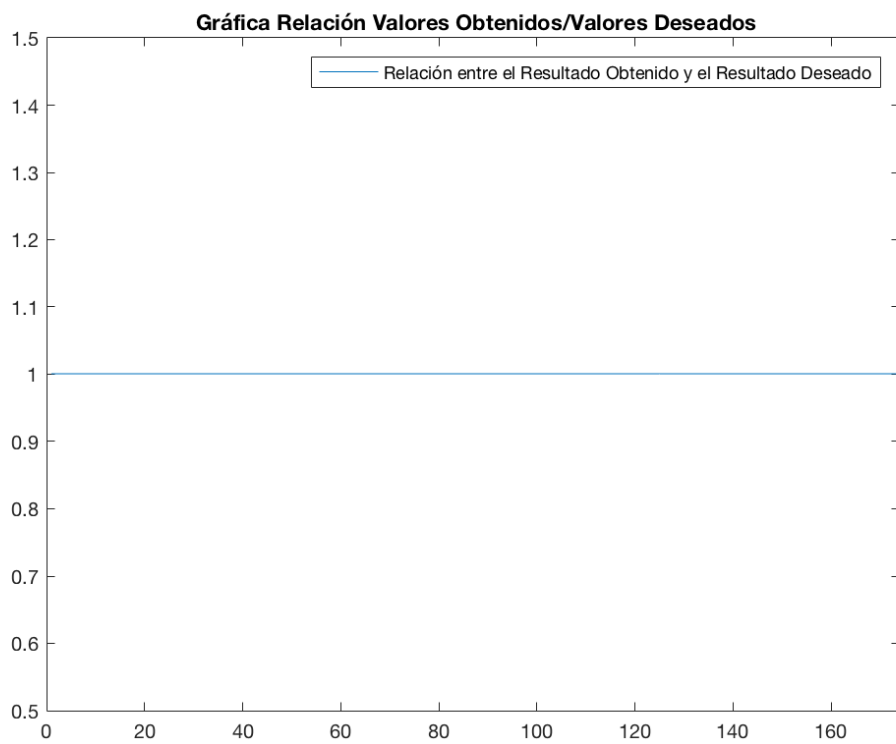


Figura 4.3. Relación Voltajes caso: Dipolo de Hertz ángulos Rx: $\theta=35^\circ$; $\phi=45^\circ$.

Tipo Antena Rx: Dipolo $\lambda/2$; Ángulos Rx: THETA=35°, PHI=45°

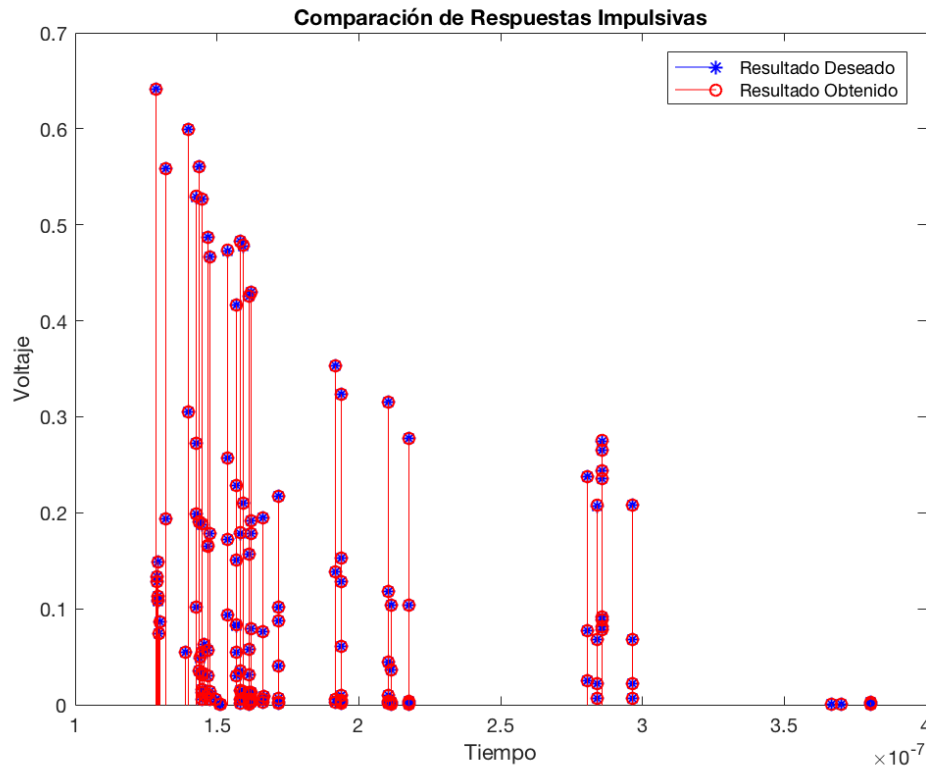


Figura 4.4. Respuesta Impulsiva Dipolo $\lambda/2$ ángulos Rx: $\theta=35^\circ$; $\phi=45^\circ$.

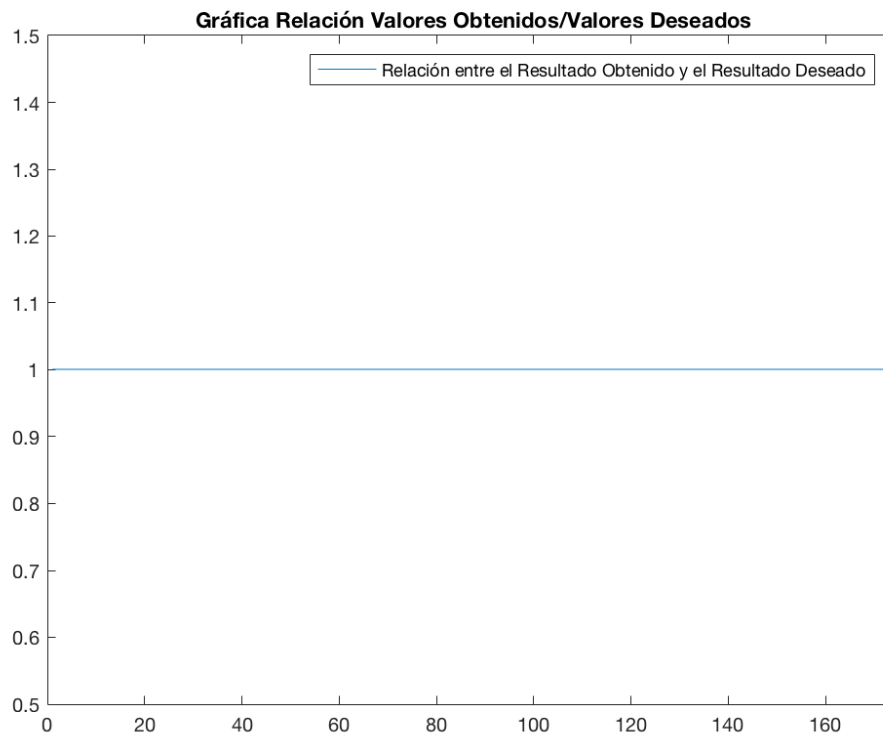


Figura 4.5. Relación Voltajes caso: Dipolo $\lambda/2$ ángulos Rx: $\theta=35^\circ$; $\phi=45^\circ$.

Tipo Antena Rx: Dipolo Hertz; Ángulos Rx: THETA=47°, PHI=97°

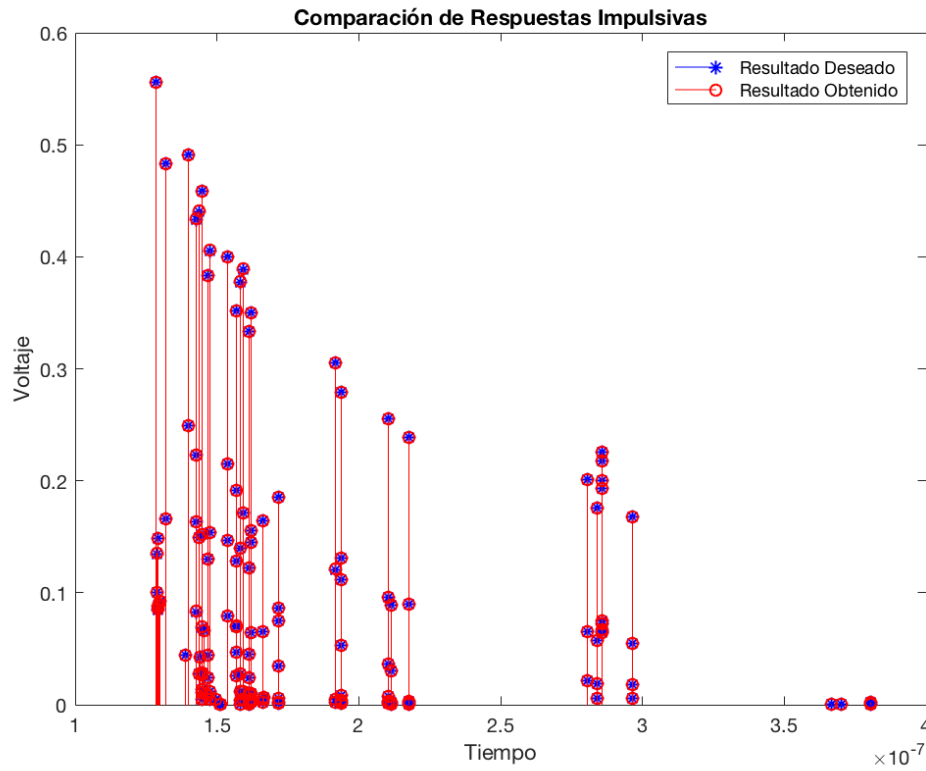


Figura 4.6. Respuesta Impulsiva Dipolo de Hertz ángulos Rx: $\theta=47^\circ$; $\phi=97^\circ$.

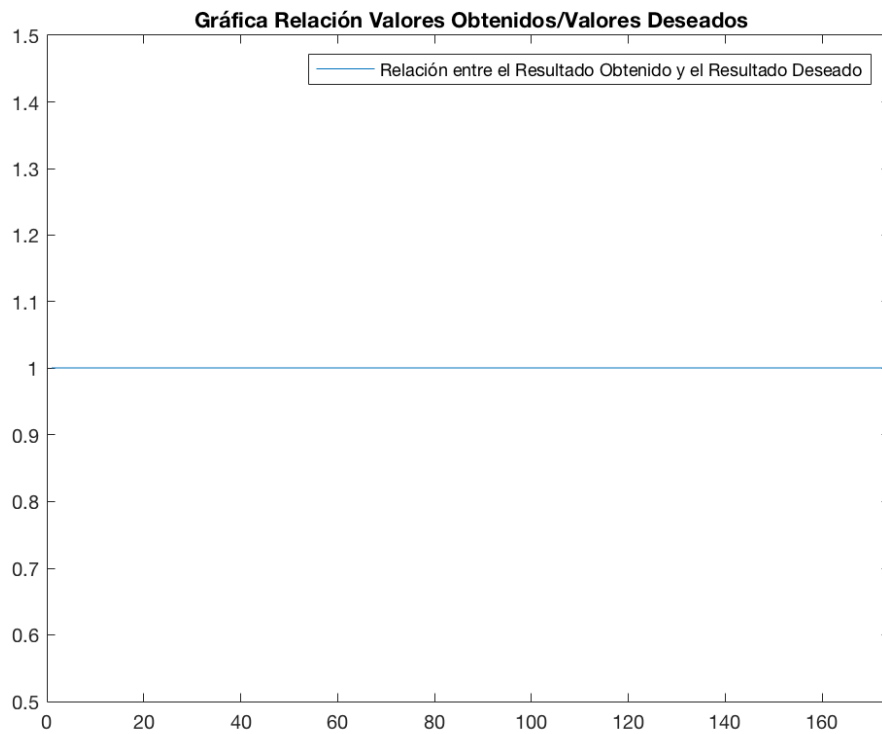


Figura 4.7. Relación Voltajes caso: Dipolo de Hertz ángulos Rx: $\theta=47^\circ$; $\phi=97^\circ$.

Tipo Antena Rx: Dipolo $\lambda/2$; Ángulos Rx: THETA=47°, PHI=97°

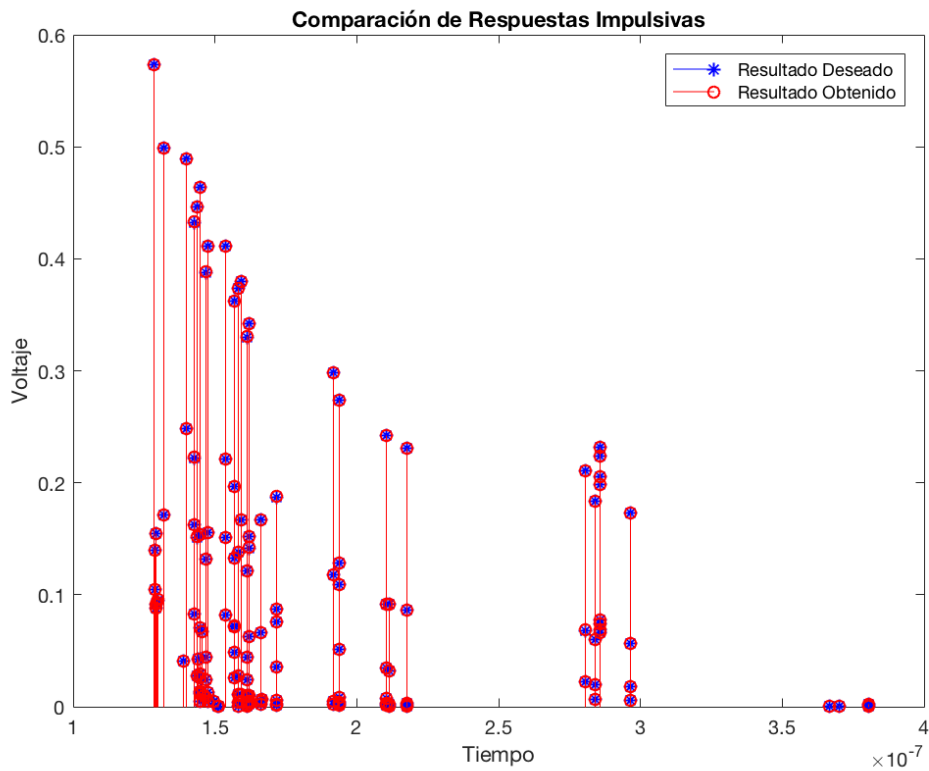


Figura 4.8. Respuesta Impulsiva Dipolo $\lambda/2$ ángulos Rx: $\theta=47^\circ$; $\phi=97^\circ$.

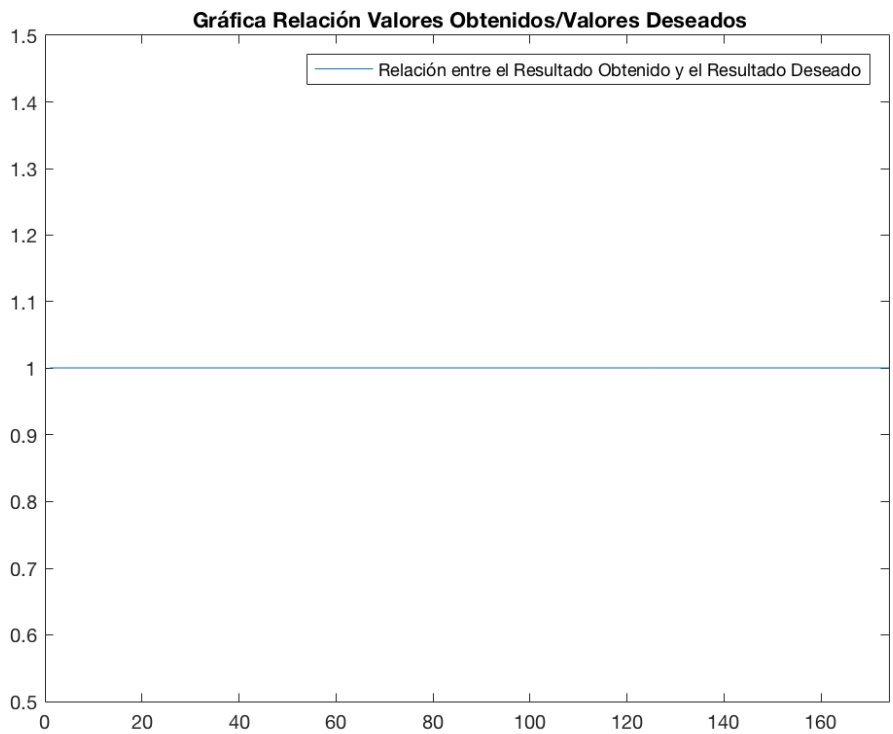


Figura 4.9. Relación Voltajes caso: Dipolo $\lambda/2$ ángulos Rx: $\theta=47^\circ$; $\phi=97^\circ$.

Tipo Antena Rx: Dipolo de Hertz; Ángulos Rx: THETA=180°, PHI=90°

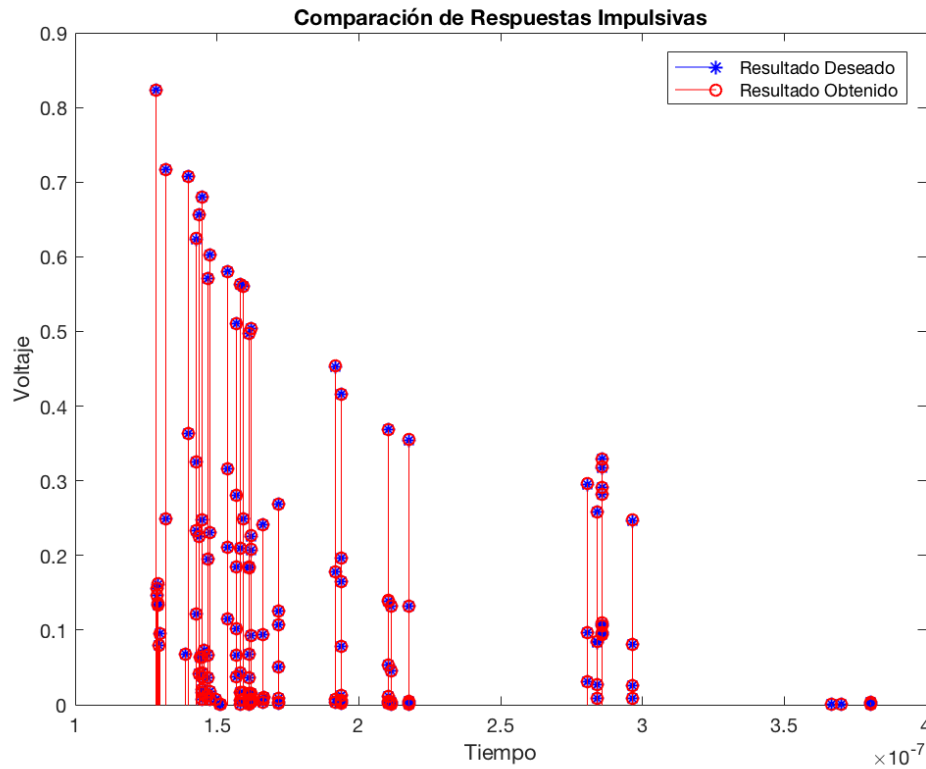


Figura 4.10. Respuesta Impulsiva Dipolo de Hertz ángulos Rx: $\theta=180^\circ$; $\phi=90^\circ$.

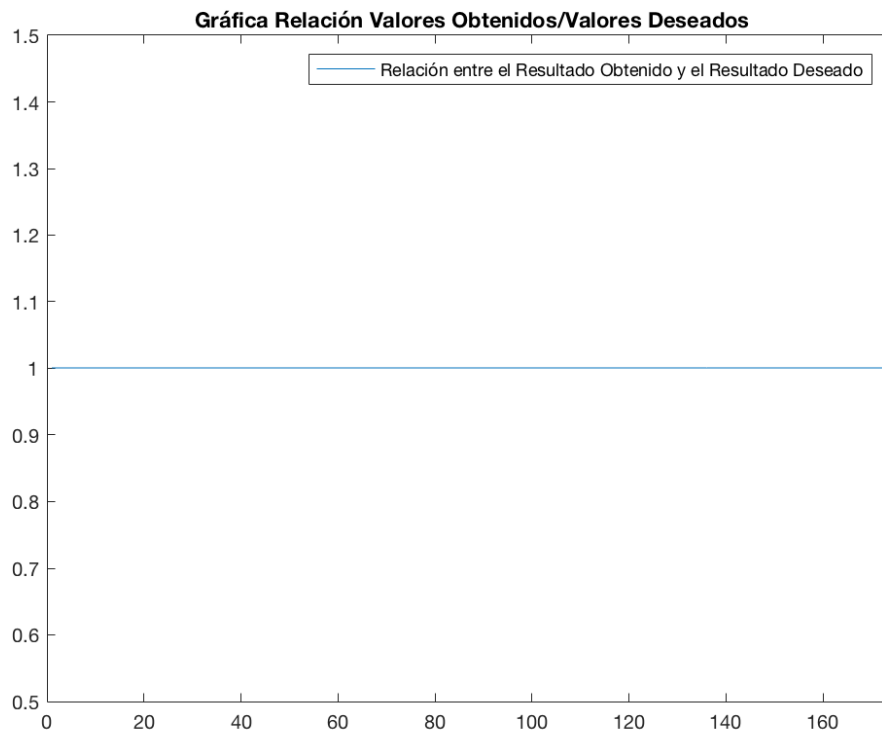


Figura 4.11. Relación Voltajes caso: Dipolo de Hertz ángulos Rx: $\theta=180^\circ$; $\phi=90^\circ$.

Tipo Antena Rx: Dipolo $\lambda/2$; Ángulos Rx: THETA=180°, PHI=90°

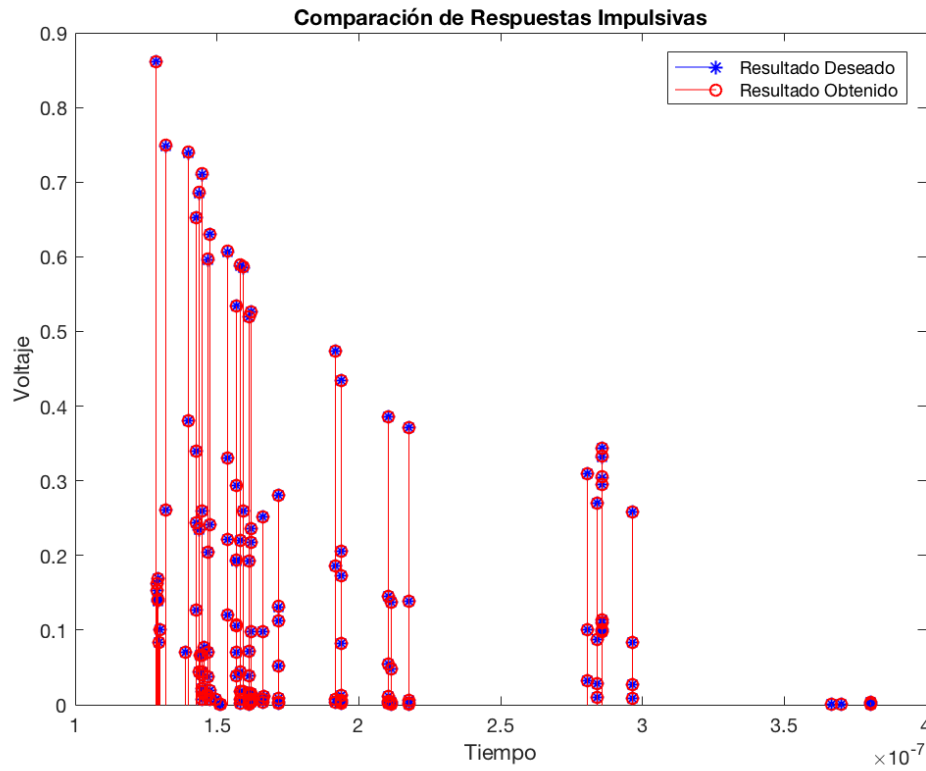


Figura 4.12. Respuesta Impulsiva Dipolo $\lambda/2$ ángulos Rx: $\theta=189^\circ$; $\phi=90^\circ$.

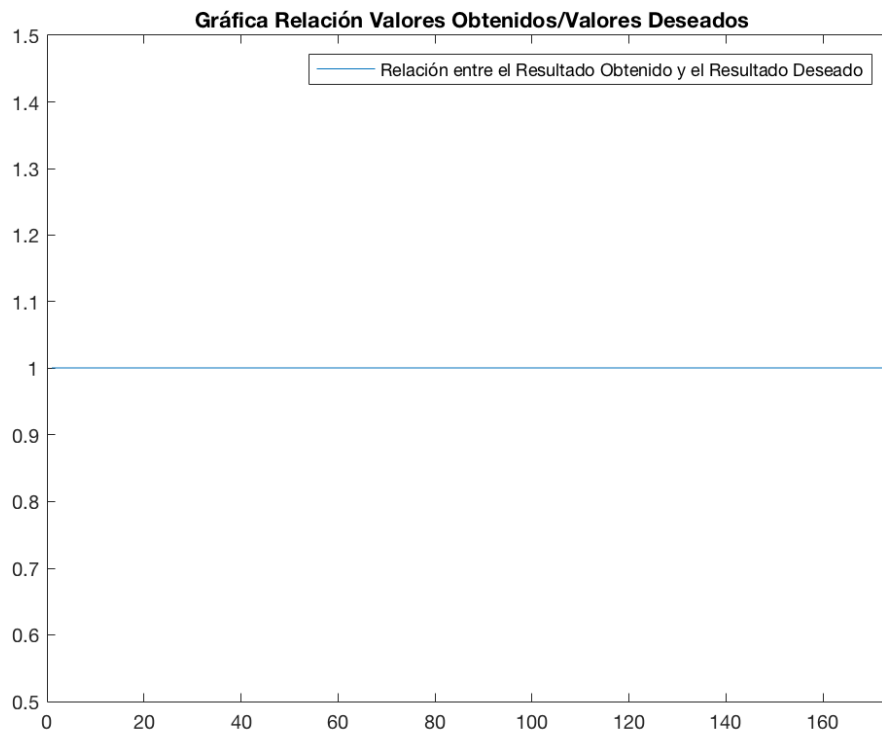


Figura 4.13. Relación Voltajes caso: Dipolo $\lambda/2$ ángulos Rx: $\theta=189^\circ$; $\phi=90^\circ$.

4.3.1.2 Posicionamiento 2

Tabla 4 Valores Posicionamiento 2

Posicionamiento Antena Tx (rojo)	X=1.04; Y=33.89; Z=2.8
Posicionamiento Antena Rx (azul)	X=31; Y=26; Z=1.6

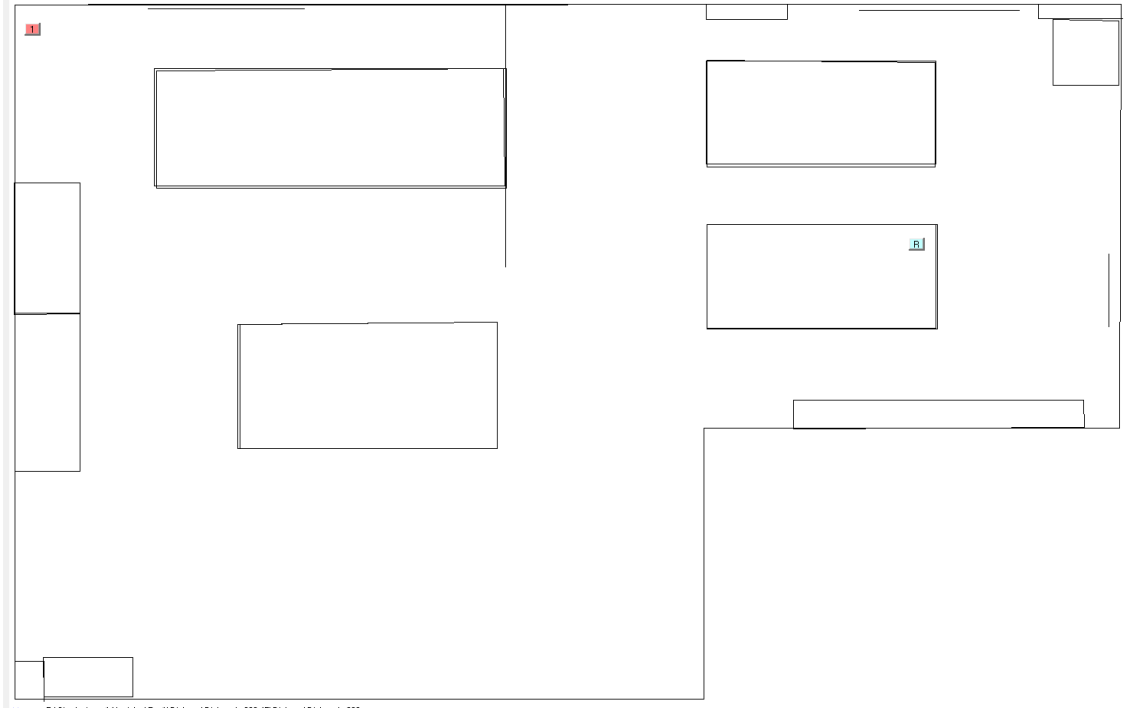


Figura 4.14. Posicionamiento 2.

Tipo Antena Rx: Dipolo de Hertz; Ángulos Rx: THETA=23°, PHI=45°

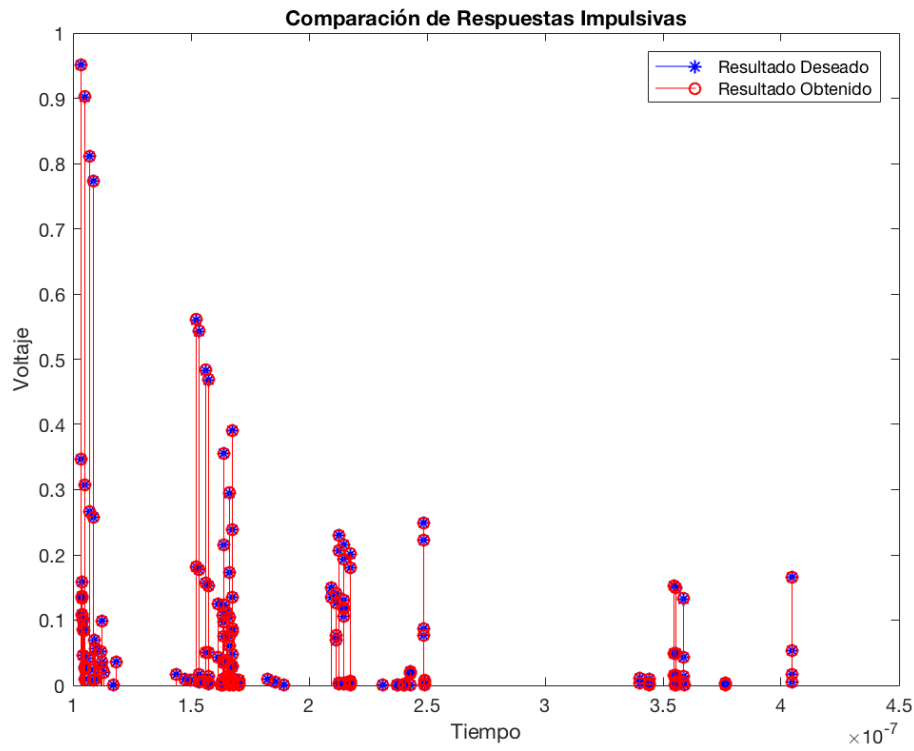


Figura 4.15. Respuesta Impulsiva Dipolo de Hertz ángulos Rx: $\theta=23^\circ$; $\phi=45^\circ$.

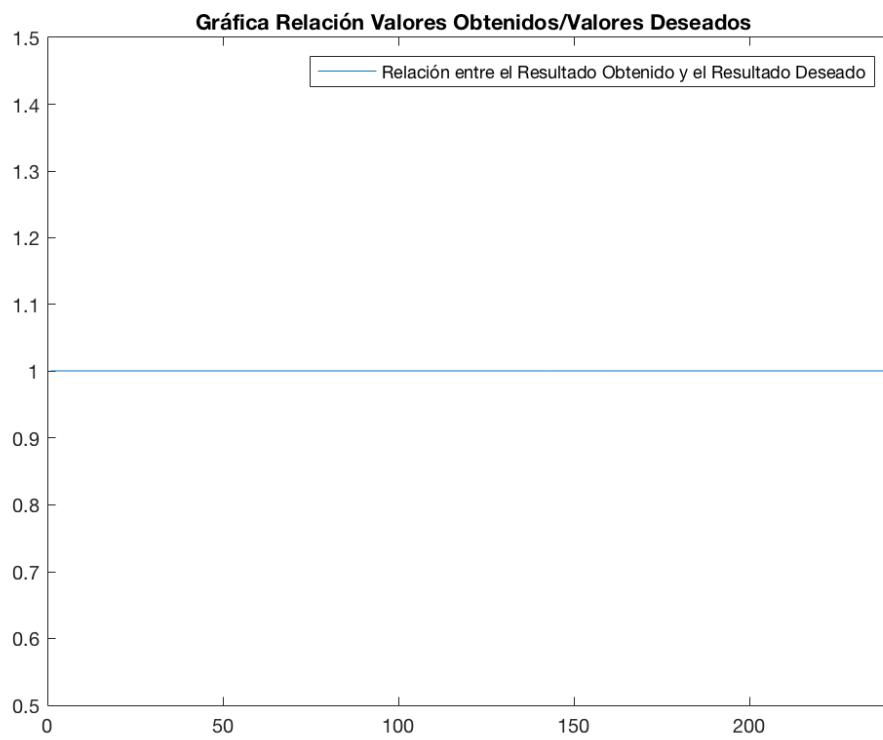


Figura 4.16. Relación Voltajes caso: Dipolo de Hertz ángulos Rx: $\theta=23^\circ$; $\phi=45^\circ$.

Tipo Antena Rx: Dipolo $\lambda/2$; Ángulos Rx: THETA=23°, PHI=45°

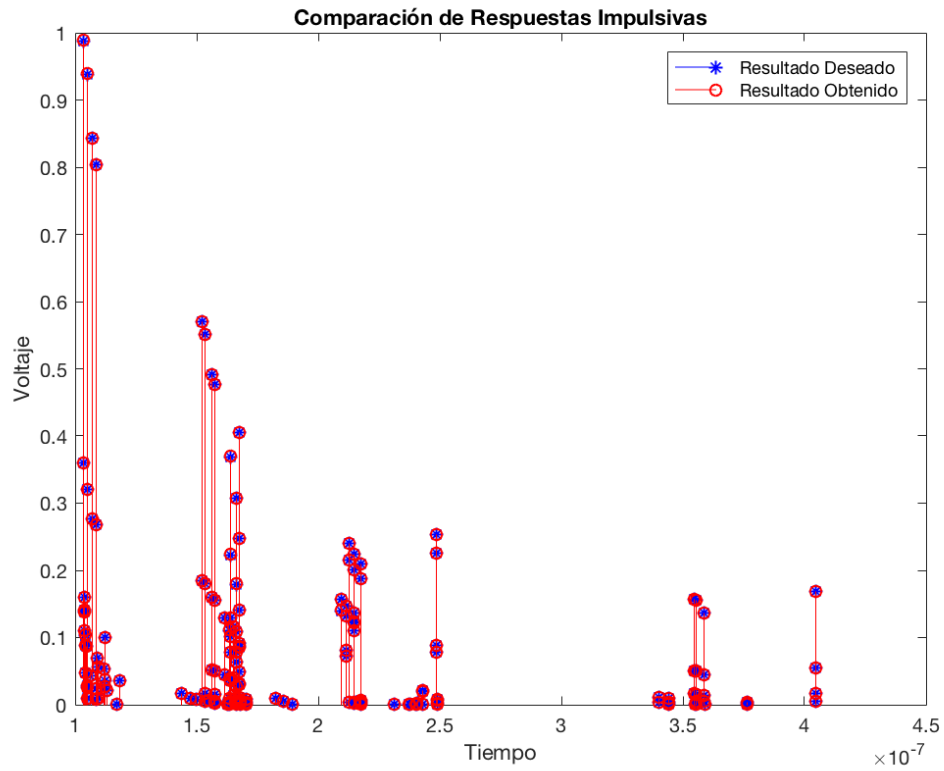


Figura 4.17 Respuesta Impulsiva Dipolo $\lambda/2$ ángulos Rx: $\theta=23^\circ$; $\phi=45^\circ$.

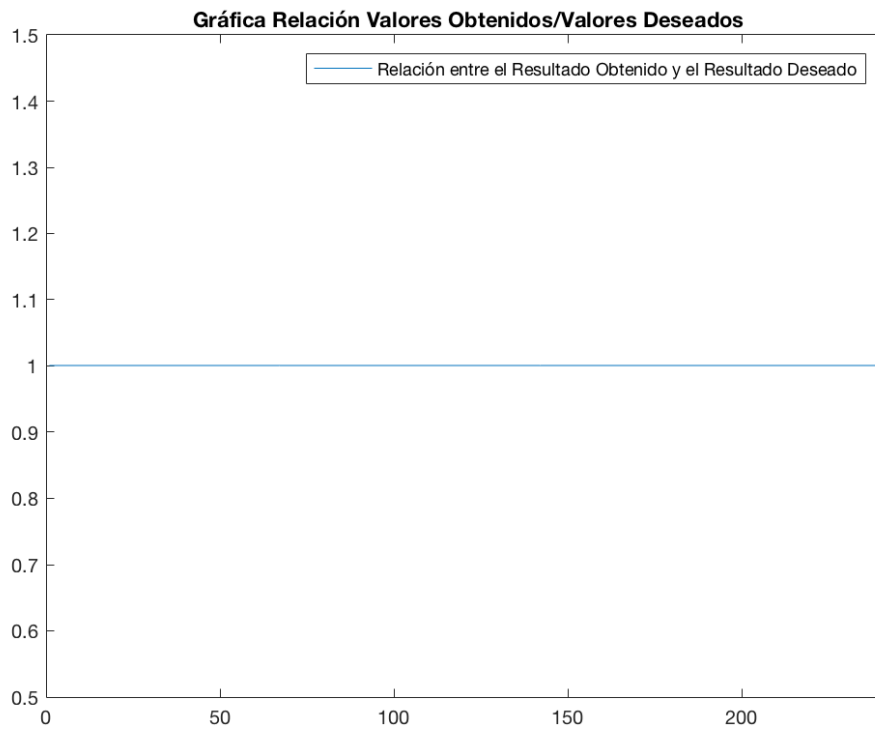


Figura 4.18. Relación Voltajes caso: Dipolo $\lambda/2$ ángulos Rx: $\theta=23^\circ$; $\phi=45^\circ$.

Tipo Antena Rx: Dipolo de Hertz; Ángulos Rx: THETA=78°, PHI=56°

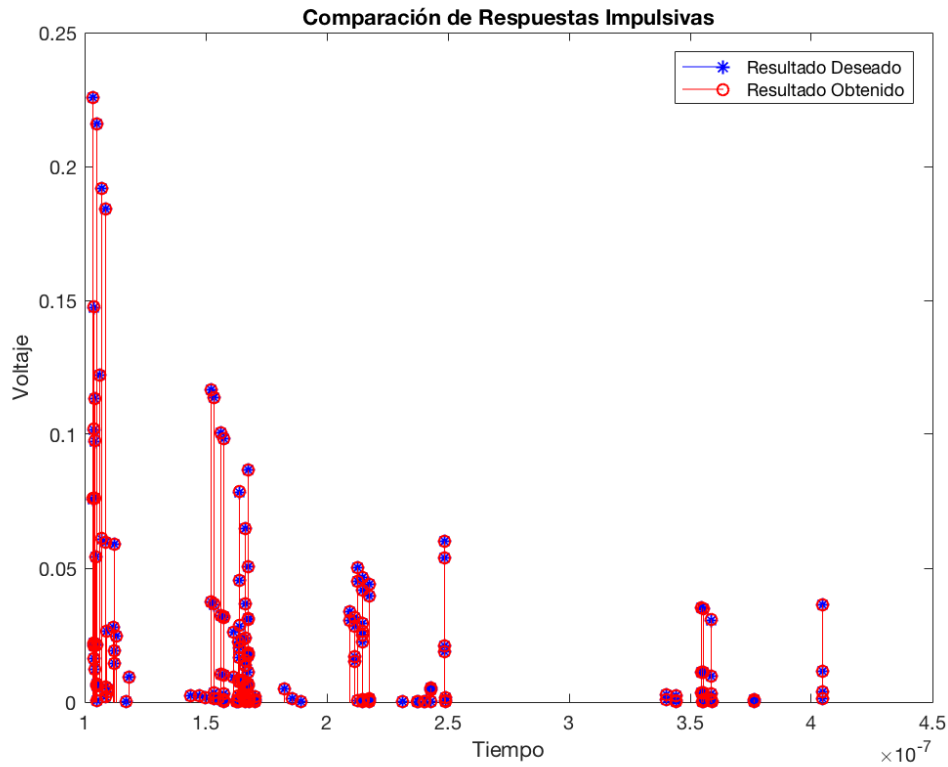


Figura 4.19. Respuesta Impulsiva Dipolo de Hertz ángulos Rx: $\theta=78^\circ$; $\phi=56^\circ$.

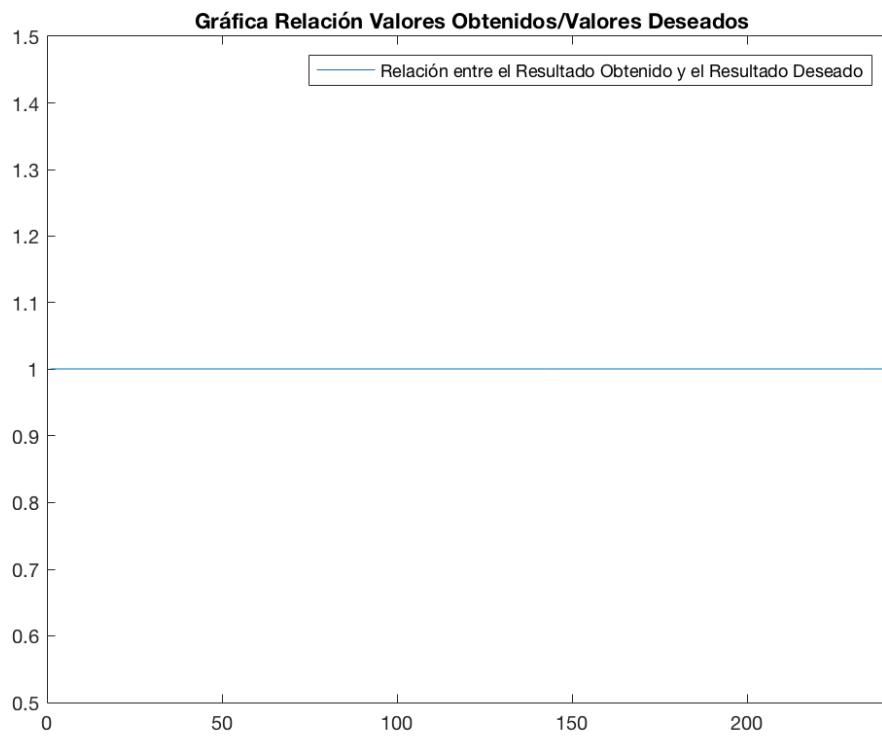


Figura 4.20. Relación Voltajes caso: Dipolo de Hertz ángulos Rx: $\theta=78^\circ$; $\phi=56^\circ$.

Tipo Antena Rx: Dipolo $\lambda/2$; Ángulos Rx: THETA=78°, PHI=56°

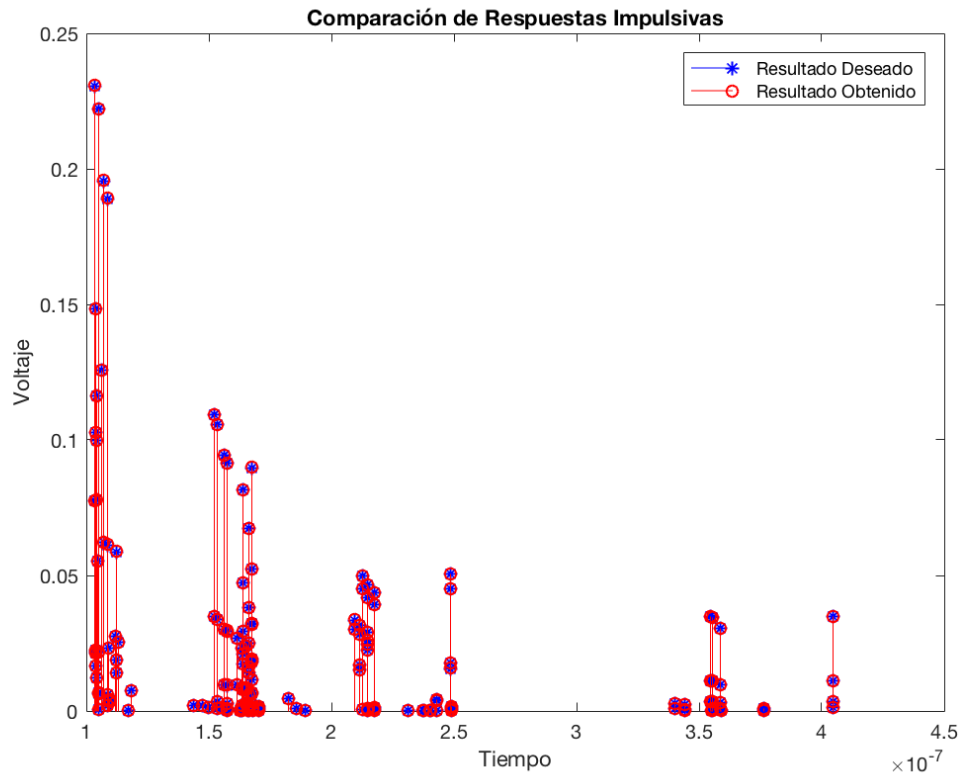


Figura 4.21. Respuesta Impulsiva Dipolo $\lambda/2$ ángulos Rx: $\theta=78^\circ$; $\phi=56^\circ$.

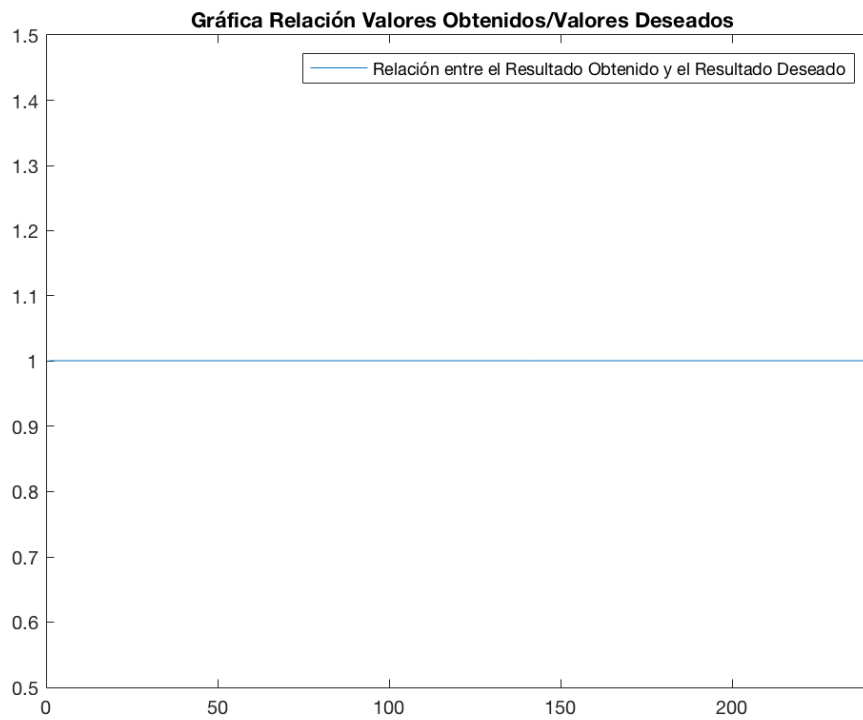


Figura 4.22. Relación Voltajes caso: Dipolo $\lambda/2$ ángulos Rx: $\theta=78^\circ$; $\phi=56^\circ$.

Tipo Antena Rx: Dipolo de Hertz; Ángulos Rx: THETA=188°, PHI=235°

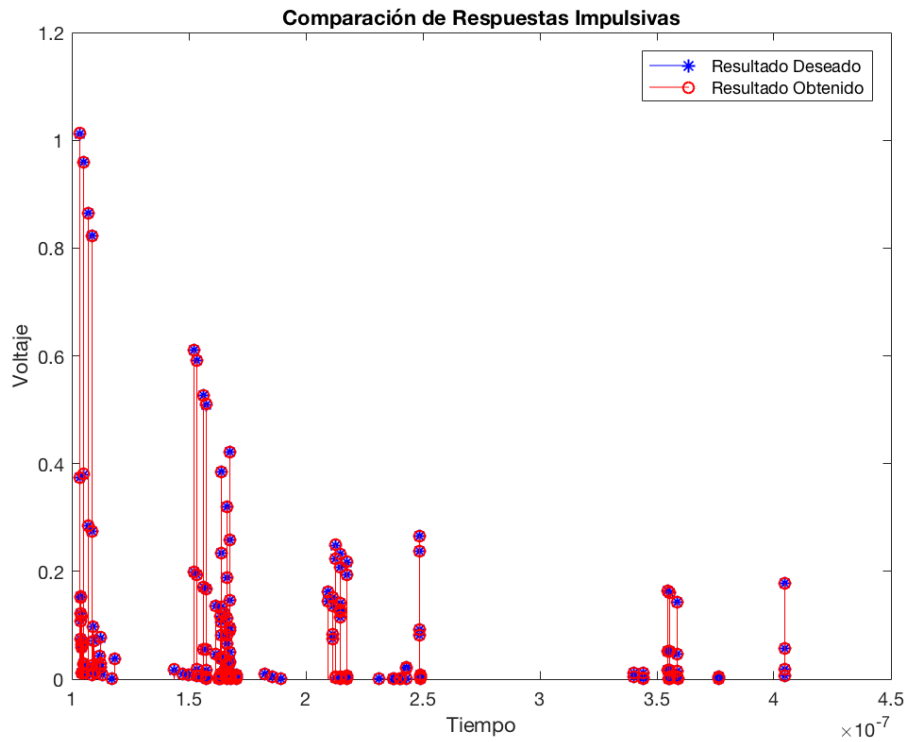


Figura 4.23. Respuesta Impulsiva Dipolo de Hertz ángulos Rx: $\theta=188^\circ$; $\phi=235^\circ$.

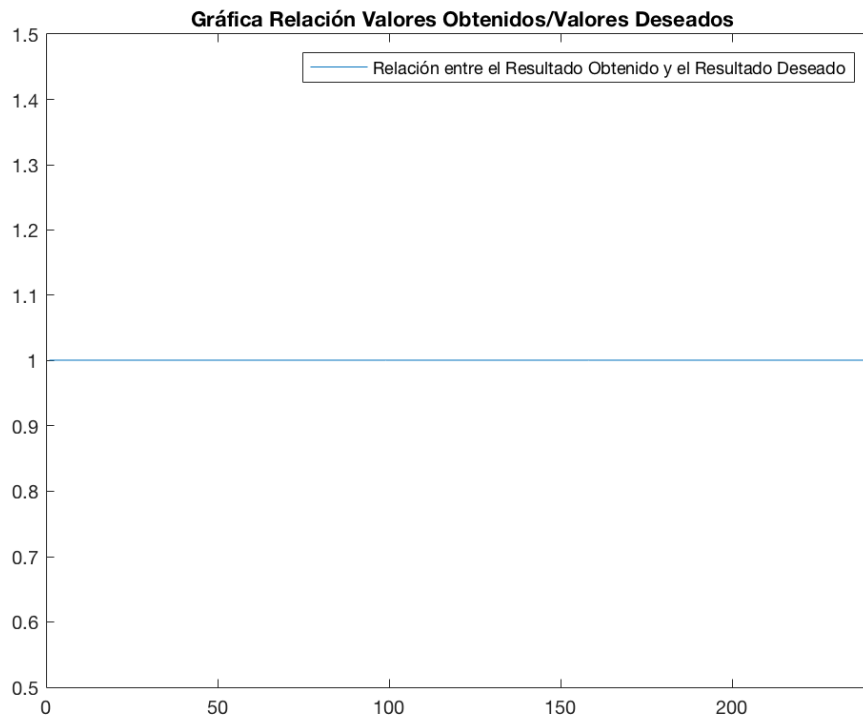


Figura 4.24. Relación Voltajes caso: Dipolo de Hertz ángulos Rx: $\theta=188^\circ$; $\phi=235^\circ$.

Comprobación de los datos obtenidos

A lo largo del apartado anterior, se han ido exponiendo diferentes ejemplos, de las simulaciones llevadas a cabo mediante la aplicación desarrollada a lo largo de este proyecto. Se ha preferido exponer cada caso en particular para cada antena, de esta manera se pueden comprobar las diferencias más fácilmente. Para cada antena se han colocado dos gráficas, una que incluía la respuesta impulsiva generada a partir de los valores obtenidos con la aplicación desarrollada y además incluía los valores generados por CINDOOR y otra que hace referencia a la relación Voltaje Obtenido/Voltaje a Obtener.

Con el objetivo de apreciar claramente los diferentes valores obtenidos, se ha optado por dibujar en la gráfica de las respuestas impulsivas el Resultado deseado con el carácter (*) en azul, y el resultado obtenido con el carácter (o) en rojo, el motivo ha sido mayoritariamente para que no se superpongan los resultados debido a su gran similitud y que si coincidían, la estrella del resultado deseado, entre, en el círculo dibujado por el resultado obtenido.

Se han realizado simulaciones en diferentes posiciones de colocación de la antena transmisora y de la antena receptora y también se han cambiando los ángulos de las antenas receptoras, con el objetivo de comprobar que el método utilizado es correcto.

En la gráfica de relación, lo que se buscaba era comprobar la similitud de los valores, y por tanto cuanto más cercano al valor 1 sea el resultado, mejor similitud tendrían. El objetivo es que la gráfica describiera una línea horizontal constante de valor 1.

Analizando las gráficas de las respuesta impulsivas, se puede verificar la veracidad de los resultados obtenidos, ya que coinciden con los resultados generados por CINDOOR. Varios casos han sido expuestos y todos han demostrado que la aplicación desarrollada funciona como es debido, ya que los valores obtenidos coinciden de una manera exacta.

Por el otro lado al analizar las gráficas de las relaciones, se comprueba que todas describen la línea horizontal constante de valor 1, buscada para poder decir que los valores son verídicos.

En definitiva, se han realizado una cantidad suficiente de simulaciones y a su vez las comprobaciones pertinentes como para aprobar la aplicación desarrollada.

4.3.2 Comparación tiempos empleados en simulación

En el apartado anterior se afirmó que la aplicación realizada funciona correctamente. En este apartado se ejecutará dicha aplicación en un entorno nuevo, caracterizado por componer gran multitud de placas, que por consiguiente necesita valores temporales de simulación altos. El objetivo de este apartado es probar el comportamiento de la aplicación desarrollada en un entorno exigente, y obtener el total del tiempo empleado, aplicando los métodos de simulación tradicionales, versus la utilización de la técnica descrita en este proyecto.

El entorno de simulación empleado es el *Salón de Actos* del edificio de la *Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación* de la *Universidad de Cantabria*, los planos bidimensional y tridimensional que describen el entorno, vienen reflejados a continuación respectivamente:

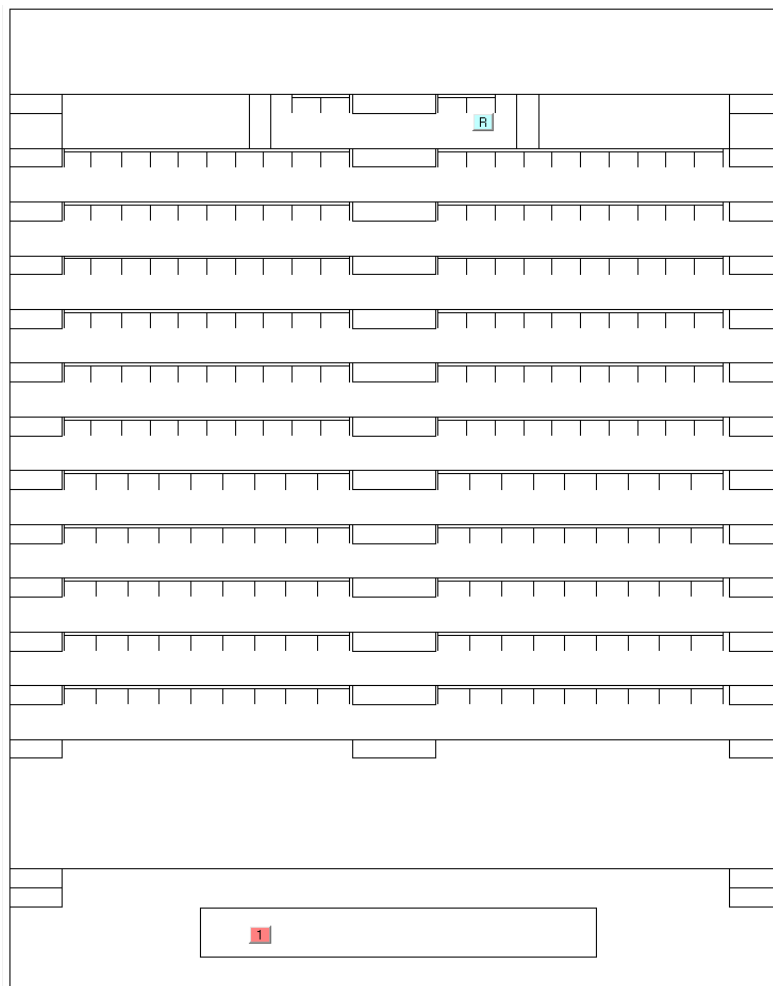


Figura 4.25. Salón de Actos 2D.

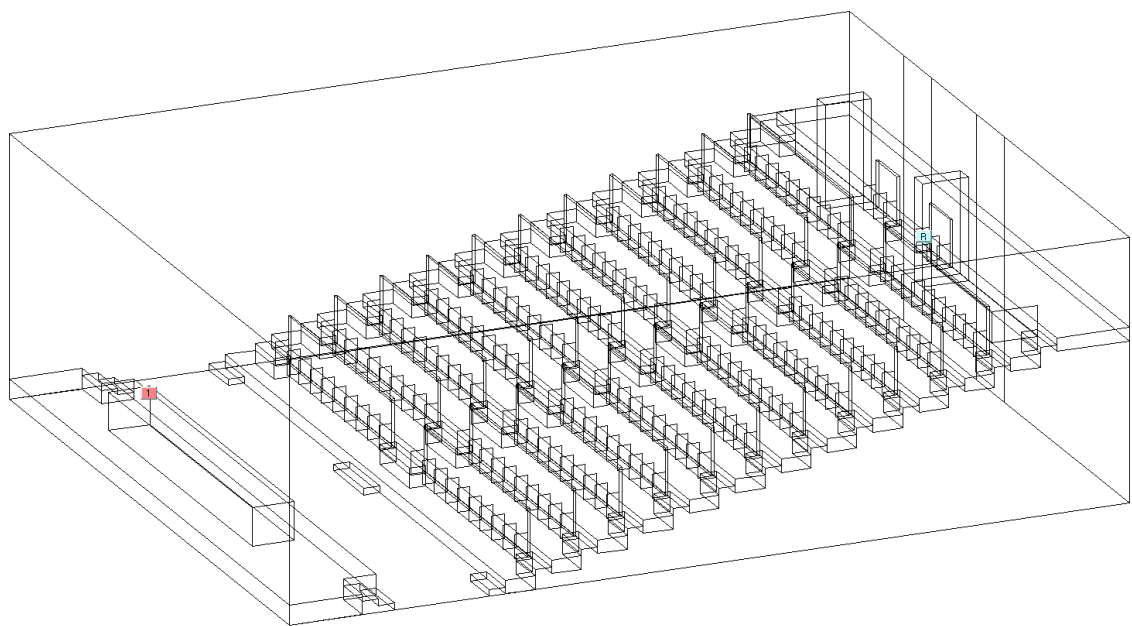


Figura 4.26. Salón de Actos en 3D

Datos Generales de la Simulación del Salón de Actos

En las siguientes tablas vienen descritos las características de simulación llevadas a cabo y los tiempo totales de simulación necesarios para simular las antenas disponibles.

Tabla 5 Datos Generales Simulación Salón de actos

Antena Transmisora	Elemental Electric Dipole
Potencia de Transmisión	1mW
Frecuencia Operación	1000 MHz
Resistencia de Radiación	73 Ohms
Resistencia de Pérdidas	0 Ohms
Campos Analizados	Direct field, 1st reflection, 2nd reflection, 3rd reflection, reflection-diffraction, 1st diffraction, diffraction-reflection, 2nd diffraction
Posicionamiento Tx	X=4.58, Y=1.22, Z=1.50
Posicionamiento Rx	X=8.61, Y=15.90, Z=4.00

Tabla 6 Tiempo de simulación de las antenas

Antena Receptora	Tiempo de Simulación (segundos)
Isotrópica	513
Dipolo Elemental	477
Dipolo $\lambda/2$	533

La tabla anterior tiene el acometido de comparar los tiempos de simulación que necesita emplear CINDOOR para simular diferentes tipos de antenas. Los valores descritos en la tabla anterior se pueden apreciar cómo la simulación de la antena isotrópica se simula en 36 segundos más que la antena Dipolo Elemental y en 20 segundos menos que el Dipolo $\lambda/2$. Por consiguiente, utilizando la tecnología desarrollada en este proyecto se consiguen ahorros temporales muy considerables. Si se hubiera querido simular las dos antenas por separado se hubiera tardado el doble, que si se hubiera utilizado la aplicación desarrollada.

La mayor ventaja de la técnica desarrollada en este proyecto, es que una vez hecha la simulación de la antena isotrópica, se pueden realizar las simulaciones que se deseen, de una manera casi inmediata, cambiando parámetros de simulación tal y como se desee, obteniendo una gran ventaja respecto al método tradicional de simular el sistema completo cada vez que se cambie de antena.

A continuación se refleja un análisis temporal detallado, de la simulación que más ha tardado en el apartado anterior, siendo la que en recepción utiliza la antena Dipolo $\lambda/2$:

Tabla 7 Análisis detallado simulación Tx: Dipolo Elemental; Rx: Dipolo $\lambda/2$.

Efectos considerados	Tiempo de CPU (segundos)
Solo rayo directo	0.56
Anterior + simples reflexiones	0.86
Anterior + dobles reflexiones	1.368
Anterior + triples reflexiones	246.80
Anterior + simples difracciones	247.85

Anterior + simples reflexiones/difracciones + simples difracciones/reflexiones	531.90
Anterior + dobles difracciones	532,78

Por tanto los cálculos que más tiempo emplean, son las triples reflexiones (245.4s) y las simples reflexiones/difracciones + simples difracciones/reflexiones (284.05s).

4.3.3 Dificultades encontradas y soluciones aplicadas

A lo largo de la realización del proyecto, ha habido un problema que debido a el, el proyecto se complicaba notoriamente. Para simplificar la elaboración del mismo, se tomó la decisión de dejar la antena transmisora fija. A continuación vendrán los detalles que explican esta decisión.

El sistema de ejes absoluto es tridimensional X, Y, Z . El modelo geométrico está diseñado respecto a un sistema de ejes, pero luego se puede tener una antena que puede tener un eje X, Y o Z , ejes que no tienen que coincidir con los ejes absolutos definidos en un principio. En el programa desarrollado, se necesita conocer la orientación de la antena y para ello el usuario cumplimenta en los recuadros pertinentes los ángulos θ y ϕ respecto a los ejes absolutos, pero a la vez la antena va a generar un campo, que se va a reflejar en las placas, entonces una de las placas tiene ejes X, Y, Z , generándose por tanto tres sistemas de ejes. En el programa se hace uso de una antena Tx y de una antena Rx, la antena Tx irradia y la antena Rx recibe, en este caso hay que poner una antena isotrópica que no distingue direcciones y a continuación simular CINDOOR, hecho que llevaría tiempo de cálculo elevado. En el proyecto se realizan simulaciones con antenas que no son reales, pero las antenas reales son una modificación de la antena original, entonces cuando tengo una antena que no es isotrópica lo que hago es multiplicar por el diagrama de radiación (ganancia que tiene seno o coseno).

Dificultad encontrada

En hecho de relacionar la antena respecto al sistema de ejes absoluto no genera ninguna dificultad, ya que el paso es simplemente relacionar los ángulos θ y ϕ que se piden al usuario en la aplicación. El diagrama de radiación es fácilmente interpretable, se sabe cómo cambia la dirección de entrada, la dirección de salida, los ángulos, el problema es la polarización del campo, que vibra en una dirección o en otra. Además de calcular el campo reflejado, hay que calcular el campo reflejado con la polarización adecuada. Si a la antena isotrópica, solamente la multiplicamos por el diagrama de radiación, solamente se está tomando en cuenta una parte y no se toma la polarización. Si se utiliza una antena real sin girarla (θ e ϕ son cero) el resultado es el adecuado, pero cuando se gira, empieza a perder la polarización, y en cada choque con cada placa, el cambio de polarización es de 90° , en una dirección o en otra y como no se dispone de la información de cómo se polariza el campo, se van experimentando pequeñas pérdidas de polarización, y cuando se llega a la receptora las pérdidas son importantes, además no hay una constante que se pueda relacionar este aspecto (Perfil potencia retardo). El resultado manifiesta los mismos tiempos pero la forma no la guarda, unos suben otros bajan y cambia un 10%, por tanto no tiene sentido perder el campo por la polarización.

Solución

El hecho de cambiar la antena isotrópica por una antena real, solamente se va a realizar en la antena Rx, la antena Tx tiene que fijarse desde el principio y se debería elegir una antena que cumpla los requisitos del sistema (se ha elegido la antena: *Dipolo $\lambda/2$*). En un principio se estaba planteando cambiar las antenas de Tx como el *Dipolo $\lambda/2$* , o el Dipolo Elemental, ahora la antena Tx va a tener que ser la misma para todos los casos. No se permite cambiar la antena Tx debido al problema de la pérdida de polarización. Al realizar este cambio se ha perdido poder utilizar diferentes antenas en transmisión, y por consiguiente, se reduce el carácter de generalidad, pero se ha comprobado que no se puede implementar. Se podría hacer, si se escribe en CINDOOR cómo entra el campo, y cómo sale, pero es muy complejo. En señal en recepción solamente se tiene que multiplicar por la ganancia de la antena receptora y por la altura efectiva.

4.4 Conclusiones Generales y Líneas Futuras

4.4.1 Conclusiones Generales

A lo largo del primer capítulo se ha contextualizado el tema del trabajo, se han relatado los objetivos a conseguir y en qué se basa el proyecto y se han enumerado los diferentes capítulos de los que se iba a componer el proyecto.

El segundo capítulo se centró en describir las teorías, ecuaciones y leyes que tienen importancia a la hora de entender los objetivos y de realizar el proyecto. La información predominante ha sido relacionada con las características que definen a una antena y a su funcionamiento. En este proyecto se han caracterizado las antenas Dipolo Elemental y el Dipolo Lambda Medios, y debido a ello se han explicado brevemente sus funcionamientos y se han expuesto sus ecuaciones características.

En el tercer capítulo se han descrito las funcionalidades de los diferentes programas utilizados, las teorías en las que se basan, y la disposición de los archivos de entrada y de salida utilizados. Con el objetivo de ahorrar tiempo, evitar errores y potenciar una mejor organización y sencillez, se ha desarrollado una aplicación mediante MatLab. Esta aplicación se puede ampliar en un futuro y en un cómputo general ha simplificado considerablemente el proceso de simulación y de guardado de los archivos resultantes, ya que no era necesario cambiar código, mediante un menú sencillo se introducían los parámetros de la antena receptora y al apretar un botón se procedía a simular. Al final del capítulo se ha hecho una descripción gráfica en 2D y en 3D con alto nivel de detalle, del entorno en el que se han realizado las simulaciones, con el objetivo de poder obtener resultados lo más cercanos a la realidad.

En el cuarto capítulo se han realizado y expuesto diferentes simulaciones, colocadas en diferentes posiciones a lo largo del entorno de simulación. Se han comprobado las simulaciones contrastando los resultados obtenidos con los que se debería obtener, mediante diferentes técnicas. Se han comparado los tiempos de simulación empleados al utilizar la técnica desarrollada en este proyecto y cuando no se ha utilizado, describiendo las ventajas de la nueva técnica versus a la tradicional. Se han detallado las dificultades experimentadas a la hora de la realización del trabajo y se han expuesto las soluciones pertinentes. Para la realización de las simulaciones se han utilizado antenas del entorno real, posibilitando también la introducción de otras nuevas antenas, y por tanto la posibilidad de ampliar esta tecnología en un futuro, tal y como se desee.

Como conclusión final se afirma que los resultados obtenidos se consideran correctos, dadas las comprobaciones llevadas a cabo y se anima a futuros usuarios de la aplicación, a introducir nuevas funcionalidades.

4.4.2 Líneas Futuras

Cambios de polarización

El mayor problema que se ha experimentado a la hora de realizar este trabajo ha sido la pérdida de la polarización al girar la antena Tx, ya que cada choque con las placas del entorno de simulación, generaba un cambio de polarización en una dirección o en otra y como no se dispone de la información de polarización del campo, el error por pérdida de polarización aumenta. Las pérdidas potencia de las señales, al llegar a la antena receptora pérdidas son importantes, experimentando valores cercanos al 10%. Para evitar este problema complejo, se decidió mantener una antena Tx fija, evitando el efecto negativo de la polarización. El hecho de implementar una técnica que tuviera en cuenta estos cambios llevaría mucho esfuerzo realizarla. Por tanto, una cuestión que aportaría mejoras a este trabajo, sería poder tener en cuenta estos cambios de polarización y por consiguiente, poder mover la antena Tx y permitir la elección de diferentes antenas en transmisión.

Incorporación de nuevas antenas

Anteriormente se ha comentado que la aplicación desarrollada se podría ampliar. El límite lo pone el desarrollador. Utilizando la aplicación desarrollada como base, se puede incorporar las características de la antena Tx, se pueden implementar las antenas que se deseen y que realicen las funciones que el desarrollador crea oportunas. Por tanto lo que se ha desarrollado en este proyecto tiene una gran proyección para el futuro, permitiendo la incorporación de nuevas opciones, características y funciones.

De hecho, a partir de la aplicación desarrollada, esta en fase de desarrollo la incorporación de una nueva antena.

Esta nueva antena es la *Hyperlink HG2458-08LP*. Es una antena periódica de registro de banda ultra-ancha de alto rendimiento, diseñada para funcionar de 2,3 GHz a 6,5 GHz. Este diseño de banda ultra ancha elimina la necesidad de comprar diferentes antenas para cada frecuencia. Esto simplifica la instalación, ya que la misma antena se puede usar para una amplia gama de aplicaciones inalámbricas donde se desea una amplia cobertura. El diagrama de radicación que describe la antena, se puede apreciar a continuación:

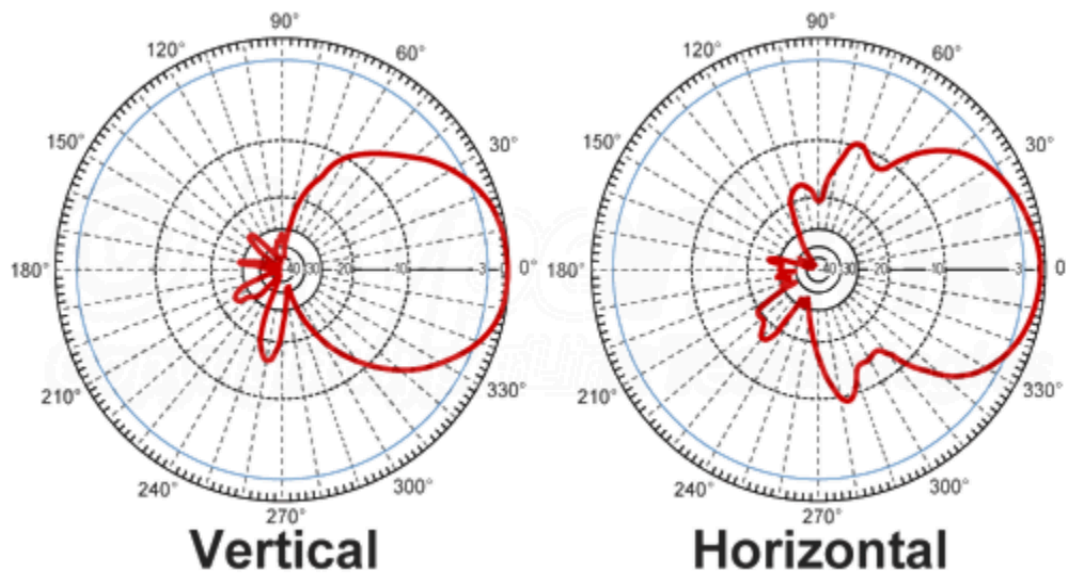


Figura 4.27. Diagrama de Radiación Antena Hyperlink HG2458-08LP (L-COM 2017)

Renunciar a la dependencia del compilador de MatLab

Un aspecto que afecta a la versatilidad de la aplicación es el hecho de que su funcionamiento depende del Compilador de MatLab. Por lo tanto sería conveniente no tener que depender de MatLab para poder ejecutar la aplicación.

Este aspecto está en fase de desarrollo y la Interfaz Gráfica de la aplicación que no necesita el compilador en MatLab en absoluto es la que viene a continuación:

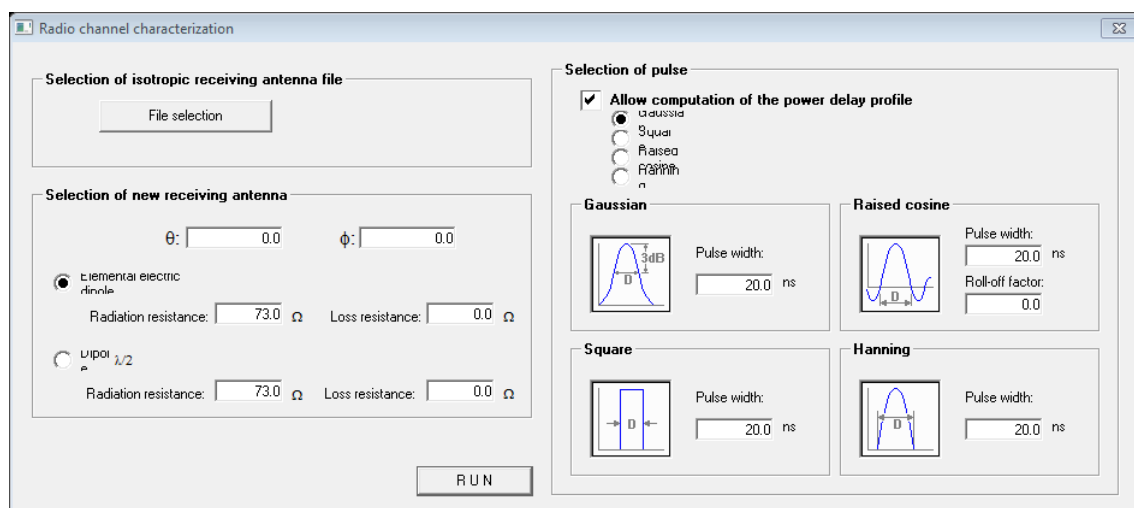


Figura 4.28. Aplicación desarrollada con Visual Basic

La aplicación está siendo desarrollada en el lenguaje de programación llamado Visual Basic de Microsoft y además de las opciones disponibles en la aplicación en este proyecto se ha incorporado la posibilidad de elegir el tipo de pulso de la señal y el ancho del mismo.

Por lo tanto este Trabajo de Fin de Grado ha servido para poner los cimientos a una tecnología para facilitar la caracterización del canal radio, y dado a que tiene ventajas interesantes, se están llevando a cabo fases de desarrollo de esta tecnología, con el fin de ampliar sus prestaciones.

5 BIBLIOGRAFÍA

Bevelacqua, Peter Joseph. *Antenna Theory*. 23 de Agosto de 2006. <http://www.antenna-theory.com/> (último acceso: 23 de Marzo de 2019).

Colaboradores de Wikipedia. *Wikipedia*. 12 de 03 de 2017. <https://es.wikipedia.org/wiki/Refracci%C3%B3n> (último acceso: 13 de 05 de 2019).

Colaboradores Wikipedia. *Wikipedia*. 21 de 03 de 2017. <https://es.wikipedia.org/wiki/Antena> (último acceso: 23 de 05 de 2019).

Fuentes, Juan José Murillo. *Fundamentos de Radiación y Radiocomunicación*. 2. Sevilla: Universidad de Sevilla, Escuela Técnica Superior de Ingeniería , 2012.

IEEE Std 145. *Std 145: Standard Definitions of Terms for Antennas*. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1983.

Keller, Joseph B. «Geometrical Theory of Diffraction.» *JOURNAL OF THE OPTICAL SOCIETY OF AMERICA* 52, nº 2 (09 1961): 15.

L-COM . *HyperLink Wireless Brand 2.3 GHz to 6.5 GHz Broadband 8 dBi Random Enclosed Log Periodic Antenna - Model HG2458-08LP*. Component Description, North Andover: L-com Inc., 2017.

R. P. Torres, L. Valle, M. Domingo, S. Loredó, M. C. Díez. «CINDOOR: An Engineering Tool for Planning and Design of Wireless Systems in Enclosed Spaces.» *IEEE Antennas and Propagation Magazine* 41, nº 4 (Agosto 1999): 12.

R. P. Torres, Susana Loredó, Luis Valle, Marta Domingo. «An Accurate and Efficient Method Based on Ray-Tracing for the Prediction of Local Flat-Fading Statistics in Picocell Radio Channels.» *IEEE Journal on Selected Areas of Communications* 19, nº 2 (February 2001): 9.

Susana Loredó, Luis Valle, Rafael P. Torres. «Accuracy Analysis of GO/UTD Radio Channel Modeling in Indoor Scenarios at 1.8 and 2.5 GHz.» *IEEE Antennas and Propagation Magazine* 43, nº 5 (October 2001).

Tomasi, Wayne. *Sistemas de Comunicaciones electrónicas*. Cuarta edición. Phoenix: DeVry Institute of Technology .

Vega, Constantino Pérez. *Sistemas de Telecomunicación*. Vol. 1. 1 vols. Santander: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cantabria, 2007.